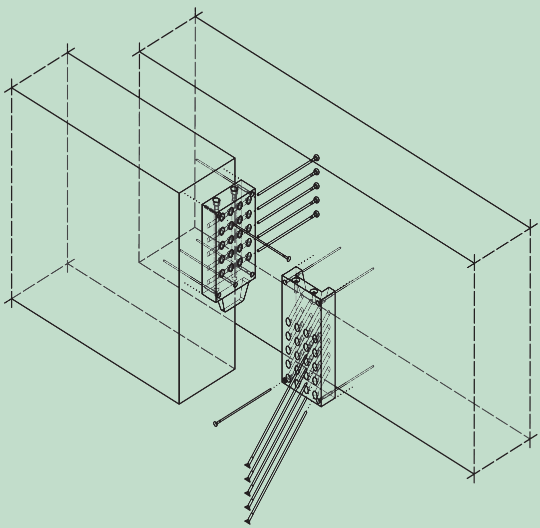
38

KARLSRUHER BERICHTE ZUM INGENIEURHOLZBAU

S. Aurand
H. J. Blaß

Verbinder aus Kunstharzpressholz mit erhöhter Reibung in der Scherfuge



KIT Scientific Publishing

S. Aurand und H. J. Blaß

Verbinder aus Kunstharzpressholz mit erhöhter Reibung in der Scherfuge

Titelbild: Haupt-Nebenträger-Verbinder aus Kunstharzpressholz.

BAND 38
Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau

Herausgeber
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Holzbau und Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Philipp Dietsch

Verbinder aus Kunstharzpressholz mit erhöhter Reibung in der Scherfuge

S. Aurand
H. J. Blaß

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Holzbau und Baukonstruktion

Scientific Publishing

Karlsruher Institut für Technologie
Holzbau und Baukonstruktion

Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft
und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen
Bundestages gefördert.

Impressum

KIT Scientific Publishing

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu

cc BY SA

This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en

cc BY ND

The cover page is licensed under a Creative Commons Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0): https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en

Print on Demand 2023 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1860-093X
ISBN 978-3-7315-1191-5
DOI 10.5445/KSP/1000145949

Vorwort

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde die Verwendung von Kunstharzpressholz für Hauptträger-Nebenträger-Verbinder als Alternative zu üblichen Aluminiumverbindern untersucht. Außerdem sollten die Verbinder angepasste Anforderungen an ihre Anwendbarkeit und Lastübertragung erfüllen. Des Weiteren sollte durch eine Oberflächenbehandlung der Verbinder die Gesamttragfähigkeit gesteigert werden.

Das Forschungsprojekt „Entwicklung hochleistungsfähiger und brandsicherer Holzverbinder aus Kunstharzpressholz“ wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen AiF im Rahmen des zentralen Innovationsprogrammes Mittelstand ZIM unter dem Förderkennzeichen ZF4250805WZ8 gefördert. Der Kooperationspartner der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine war die Pitzl Metallbau GmbH aus Altheim.

Alle Versuche wurden im Holzbaulaboratorium der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Für die Herstellung der Versuchskörper und der Versuchseinrichtung waren alle Labormitarbeiter:innen maßgeblich beteiligt. Bei der Versuchsdurchführung und der Auswertung der Ergebnisse haben zahlreiche Studierende und wissenschaftliche Hilfskräfte tatkräftig mitgewirkt.

Allen Beteiligten ist für ihre Mitarbeit zu danken!

Die Verfasser.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Marktbedarf

Holz zeichnet sich aufgrund seiner sehr guten Eigenschaften als natürlicher Baustoff aus. Zum einen ist hier die hohe Belastbarkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht zu nennen, zum anderen die leichte Bearbeitbarkeit, weshalb Holz seit jeher für die Nutzung in Bauwerken verwendet wird. Aufgrund der heutigen Energie- und Umweltdiskussionen ist Holz als nachwachsender Rohstoff wichtiger denn je, da er in der CO_2-Bilanz neutral erscheint.

Besondere Bedeutung kommt beim Bauen mit Holz den Verbindungen der Tragelemente untereinander zu, da diese im Holzbau in der Regel schwächer sind als die zu verbindenden Bauteile. In einer Holzkonstruktion wird die Wahl der Verbindung nicht nur durch die Belastung und die Tragfähigkeit bestimmt, auch der Herstellungsprozess und die Kosteneffizienz sind zu berücksichtigen.

Im Allgemeinen kann bei Verbindungen zwischen zimmermannsmäßigen Holzverbindungen, metallischen Verbindungen, die mit unterschiedlichen Verbindungsmitteltypen ausgeführt werden können und geklebten Verbindungen unterschieden werden. Bei der Ausführung von Hauptträger-Nebenträger-Verbindungen in tragenden Holzkonstruktionen kommen insbesondere metallische Verbindungen mit Schrauben, sogenannte Systemverbinder, zum Einsatz, welche große Kräfte übertragen können.

Systemverbinder sind zweiteilige, stirnseitig anzubringende Verbinder aus Aluminiumlegierung, wie in Bild 1.1 zu sehen. HVP-Verbinder der Firma Pitzl Metallbau GmbH weisen einen leicht konischen Schwalbenschwanz auf, sodass sie leicht ineinander gleiten. Zudem können sie mittels von oben einzudrehenden Schrauben gegen Abheben gesichert werden. Seine Formgebung und die Verwendung von geneigt eingedrehten Schrauben verleihen dem HVP-Verbinder eine sehr hohe Tragfähigkeit, je nach Verbindergröße zwischen 2 bis 622 kN. Die Verbinder können bereits im Betrieb vormontiert werden, wodurch der Zusammenbau auf der Baustelle zusätzlich beschleunigt wird.



Bild 1.1: Systemverbinder HVP der Firma Pitzl im montierten Zustand.

Die Form des Schwalbenschwanzes kann jedoch sowohl für die planenden Ingenieure als auch die ausführenden Handwerker zu einigen Problemen führen. Vor allem die sehr langen Einschublängen sind hier negativ zu erwähnen. Nach Herstellerangaben haben Haupt-Nebenträger-Verbindungen keine Tragfähigkeit für eine Momentenbeanspruchung und werden daher in der Bemessung als gelenkige Anschlüsse betrachtet. Doch Versuche haben gezeigt, dass aufgrund der langen Einschublänge signifikante Momente übertragen werden und eine gelenkige Lagerung nicht der Fall ist.

Auch bei der anschließenden Fertigung der Bauteile muss ein hohes Augenmerk auf die Passgenauigkeit gelegt werden. Schon wenige Millimeter Abweichung bei der Bauteillänge führen je nach Einschublänge der Verbinder zu großen Problemen. Die Verbinderplatten müssen mit großer Kraftanstrengung ineinander geführt werden, was wiederum zu Zwängungen im Verbinder und zu Vorbelastungen der Verbindungsmittel führt.

Der eingesetzte Hochleistungsaluminiumwerkstoff bringt ebenfalls verschiedene Nachteile mit sich, durch die das Einsatzspektrum der Systemverbinder begrenzt wird. Nachteilig ist zum einen die sehr energieintensive Herstellung der Aluminiumlegierungen. So liegt der Primärenergieaufwand für die Herstellung eines Kubikmeters um das mehr als 5-fache über dem von Stahl und mehr als 100-fache über dem von Holz (siehe Bild 1.2 links). Durch die Verwendung von Aluminiumverbindern verschlechtert sich somit die Ökobilanz des Bauwerks.

Zum anderen wirkt sich auch die schlechte Feuerbeständigkeit der Verbinder nachteilig aus. Zwar ist Aluminium selbst nicht brennbar und kann in die Brandschutzklasse A1 (nichtbrennbare Baustoffe) nach DIN 4102 [18] eingeteilt werden, die Wärmeleitfähigkeit ist mit ca. 200 W/mK aber zweieinhalb mal so hoch als bei Stahl und um den Faktor 10^3 größer als bei Holz (siehe Bild 1.2 rechts). Der Schmelzpunkt ist mit 660°C bedenklich niedrig, da diese Temperatur bei einem Brand schon nach wenigen Minuten erreicht werden kann. Um nun jegliche Anforderungen an die Feuerwiderstandsklasse zu erfüllen, müssen die Verbinderplatten allseitig von Holz oder Holzwerkstoffplatten mit entsprechender Dicke ummantelt werden. Daraus folgt automatisch ein höherer Material- und Montageaufwand.

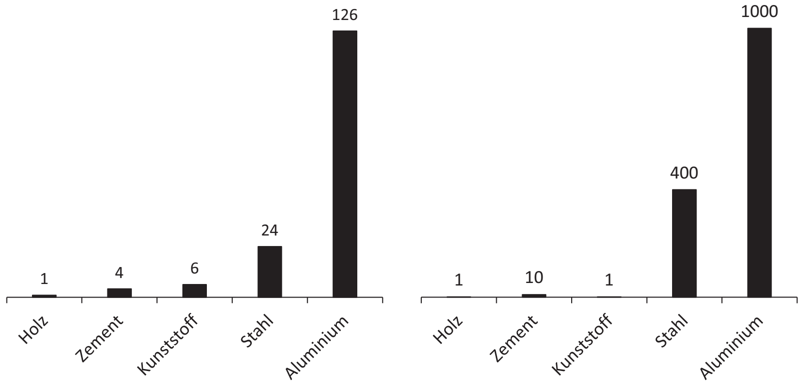


Bild 1.2: Verhältnis des Primärenergieaufwandes für die Herstellung von einem Kubikmeter Baustoff (links) und das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeiten derselben Baustoffe (rechts).

1.2 Projektbeschreibung

Zur Reduzierung der aufgeführten Nachteile sollen im Forschungsprojekt neuartige Verbinder entwickelt und geprüft werden. Um den Brandschutzanforderungen gerecht zu werden, sollen erstmals Verbinder aus Kunstharzpressholz hergestellt werden. Kunstharzpressholz (KPH) ist ein Holzwerkstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit ähnlich der von Holz aber dennoch mit einer deutlich geringeren Abbrandrate. Somit kann bei der Verwendung von KPH die aufwändige Ummantelung der Verbinder entfallen.

In einem weiteren Schritt soll zusätzlich zu dem neuen Material auch die Form der Verbinder grundlegend geändert werden. So soll zum einen der Einführstutzen deutlich verkürzt werden, um das Einschieben der Verbinderplatten auf der Baustelle zu vereinfachen. Auch wird aufgrund der kurzen Einschublänge ein Verdrehen des Nebenträgers möglich

und der Anschluss kommt einer gelenkigen Lagerung nahe. Zum anderen soll die neue Verbinderform einen Toleranzausgleich von wenigen Millimetern möglich machen und so Zwängungen in den Bauteilen bei Maßungenauigkeiten vermeiden.

Der Lastabtrag der Verbinder erfolgt weiterhin über geneigte Schrauben, welche so fast ausschließlich auf Zug belastet werden. Um die Tragfähigkeit weiter zu erhöhen, soll durch eine Oberflächenbehandlung der Verbinderplatten die Reibung in der Scherfuge signifikant erhöht werden.

So werden zu Beginn dieses Projektes viele verschiedene Möglichkeiten zur Oberflächenbehandlung untersucht und in Reibversuchen der Reibungskoeffizient der jeweiligen Oberflächen bestimmt. Darauf aufbauend werden in Druck-Scher-Versuchen die Tragfähigkeiten und Steifigkeiten von Verbindungen mit verschiedenen Oberflächen und verschiedener Schraubenanzahl, -anordnung und -abmessung bestimmt. Anschließend werden auf Grundlage der Versuchsergebnisse verschiedene Verbinderprototypen gefertigt und unter Beanspruchung in verschiedene Richtungen geprüft.

Die Verbinderprototypen werden vom Projektpartner Pitzl Metallbau GmbH & Co.KG in Altheim hergestellt.

2 Hauptträger-Nebenträger-Verbindungen

2.1 Allgemeines

Haupt- und Nebenträger sind horizontale Tragelemente, welche beidseitig aufgelagert sind und hauptsächlich auf einachsige Biegung beansprucht werden. Die Biegebeanspruchung im Träger wird durch senkrecht wirkende Lasten erzeugt. Die beidseitige Lagerung der Nebenträger erfolgt jeweils an einem Hauptträger. Bei einer Hauptträger-Nebenträger-Verbindung (HT-NT-Verbindung) müssen Kräfte in verschiedenen Richtungen übertragen werden. Die jeweiligen Richtungen sind dabei folgendermaßen definiert (siehe auch Bild 2.1):

- Kraft F_1 in Achsrichtung des Nebenträgers
- Kraft F_2 senkrecht zum Nebenträger (und Hauptträger)
- Kraft F_3 senkrecht zum Nebenträger aber entgegen der Kraft F_2
- Kraft F_{45} senkrecht zum Nebenträger (in Achsrichtung des Hauptträgers)
- Moment M_2 durch Biegebeanspruchung des Nebenträgers

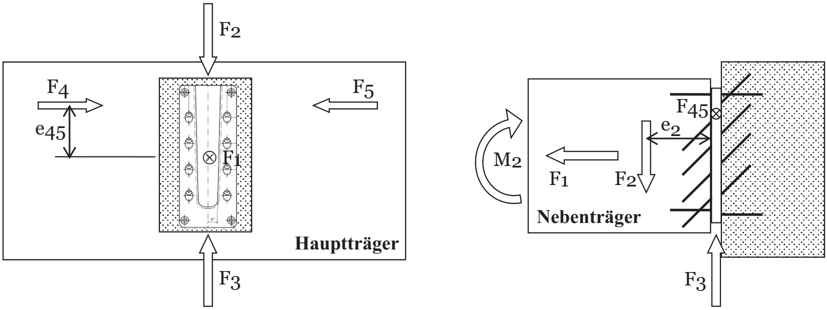


Bild 2.1: Definition der Belastungsrichtungen (in Anlehnung an ETA-15/0187).

Der Anschluss des Nebenträgers an den Hauptträger kann unter anderem auf folgende Arten erfolgen:

- Kontaktverbindung
- Verbindung mit gekreuzten Schrauben
- Systemverbinder

Zu den Kontaktverbindungen gehört z.B. die Schwalbenschwanz-Verbindung (Bild 2.2 links). Mit Hilfe moderner Abbundanlagen können die beiden Hälften einer Schwalbenschwanz-Verbindung maßgenau in den Haupt- und Nebenträger gefräst werden. Die Tragfähigkeit der Verbindung hängt stark von den Festigkeitseigenschaften der Haupt- und Nebenträger ab und erfordert eine hohe Maßhaltigkeit aller Bauteile, sodass der Zusammenbau auf der Baustelle problemlos erfolgen kann.

Eine weitere Möglichkeit zum Verbinden von Haupt- und Nebenträger besteht in der Verwendung von selbstbohrenden Schrauben (Bild 2.2 rechts). Diese Art der Verbindung fordert keine besondere Passgenauigkeit der Bauteile, kann aber auch erst auf der Baustelle erfolgen. Ausführliche Bemessungstafeln verschiedener Schraubenhersteller erleichtern den planenden Ingenieuren die Auswahl passender Schrauben.

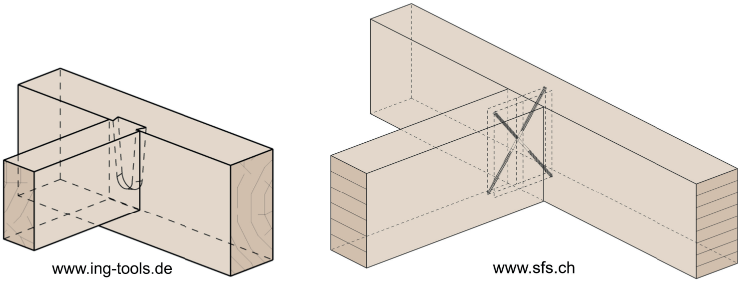


Bild 2.2: Links: Schwalbenschwanz-Verbindung. Rechts: gekreuzte Vollgewindeschrauben.

2.2 Systemverbinder

Die wirtschaftlichste und daher meistverbreitete Ausführung von Haupt-Nebenträger-Verbindungen erfolgt mit sogenannten Systemverbindern. Dabei handelt es sich um ein- oder zweiteilige Verbinder aus Stahl oder Aluminium. Ihr großer Vorteil liegt in ihrem hohen Vorfertigungsgrad, d.h. die Verbinderplatten können in der Produktionshalle an den Holzbauteilen befestigt werden und müssen dann vor Ort auf der Baustelle nur noch zusammengefügt werden. Dies erfordert jedoch eine sehr hohe Maßgenauigkeit der Bauteile. Systemverbinder gibt es in den unterschiedlichsten Ausführungen und Größen. Eine Variante sind sogenannte Schwalbenschwanzverbinder, wie in Bild 2.3 zu sehen.

Bei Schwalbenschwanzverbindern wird die Form der Kontaktverbindung aufgegriffen und in Aluminium gefräst. Die Befestigung der beiden Platten erfolgt jeweils mit Vollgewindeschrauben, welche zum größten Teil um 45° geneigt sind. Optional können die Verbinderplatten noch entgegen der Einschubrichtung mit Schrauben gesichert werden. Die Bandbreite der zur Verfügung stehenden Verbinder (am Beispiel von HVP-Verbindern der Firma Pitzl) reicht von dem kleinsten Verbinder mit Maßen von 25x40x12 mm, der mit sechs Schrauben 4,5x50 mm eine

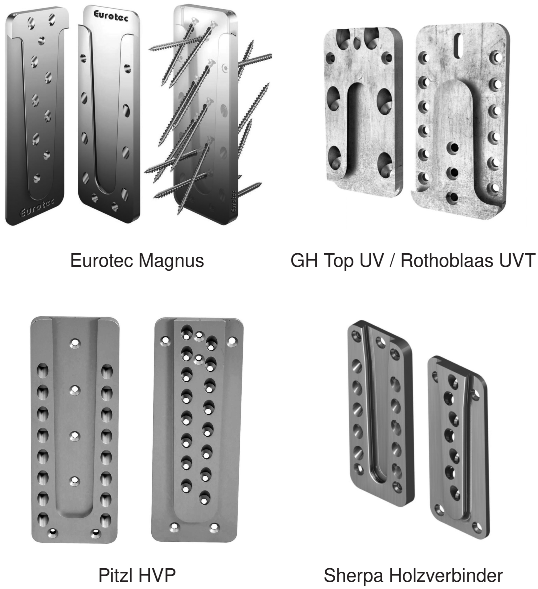


Bild 2.3: Übersicht über Schwalbenschwanzverbinder.

charakteristische Tragfähigkeit von 2,42 kN erreicht, bis hin zum Doppel-Schwerlast-HVP-Verbinder mit Maßen von 240x600x20 mm, der mit 92 Schrauben 8x200 mm eine charakteristische Tragfähigkeit von 616 kN erreicht.

2.2.1 Befestigung

Die Befestigung von Systemverbindern erfolgt fast ausschließlich mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben. Zur Fixierung der Verbinderplatten werden Schrauben senkrecht zur Verbinderebene eingedreht, auch als Montageschrauben bezeichnet. Der Lastabtrag erfolgt jedoch primär über geneigt eingedrehte Schrauben, auch Schrägschrauben genannt. Der Vorteil von geneigten Schrauben liegt darin, dass die Schrauben aufgrund der Schrägstellung fast ausschließlich durch Zugkräfte

beansprucht werden und die Zugtragfähigkeit von Schrauben deutlich höher ist als ihre Abschertragfähigkeit, wie Bejtka & Blaß [1] zeigten.

Systemverbinder können entweder verdeckt oder sichtbar eingebaut werden. Für den verdeckten Einbau muss entweder am Haupt- oder Nebenträger eine Vertiefung in der Größe der Verbinderplatte gefräst werden. Bei der sichtbaren Montage werden die Verbinderplatten plan am Haupt- und Nebenträger aufgeschraubt und es entsteht eine Schattenfuge beim Zusammenführen der Verbinderplatten.

2.2.2 Brandschutz

Systemverbinder aus Metall sind nicht brennbar und können daher hinsichtlich ihres Brandverhaltens in die Klasse A1 (nichtbrennbare Baustoffe) nach DIN 4102 eingeteilt werden. Jedoch verlieren Verbinder und Verbindungen aus Metall im Brandfall schnell ihre Tragfähigkeit aufgrund der Hitzeeinwirkung. Zusätzlich wird durch die Wärmeleitung der Metallteile das umgebende Holz erhitzt und so die Lochleibungsfestigkeit und Ausziehtragfähigkeit reduziert. Daher sind bei Anforderungen an die Feuerbeständigkeit die Systemverbinder allseitig durch Holz oder Holzwerkstoffplatten mit einer Dicke von a_{fi} zu schützen. Holz ist brennbar und wird nach DIN 4102 in die Klasse B2 (normalentflammbare Baustoffe) eingeteilt. Aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit sorgt Holz für eine gute Isolation und somit wird eine schnelle Wärmeleitung durch das Holzbauteil verhindert. Eine weitere positive Eigenschaft von Holz beim Brandfall ist die Bildung einer Holzkohleschicht an der Oberfläche des Holzes. Diese wärmedämmende Schicht hat eine Wärmeleitfähigkeit, die nur noch ein Sechstel der Wärmeleitfähigkeit von Holz beträgt und somit den im Inneren liegenden Restholzquerschnitt als natürliche Dämmschicht vor Zersetzung in Folge des Brandprozesses schützt. Ebenso werden Systemverbinder durch diese Ummantelung geschützt (siehe

Bild 2.4 links), deren Dicke a_{fi} sich als Produkt der Abbrandrate des verwendeten Holzes bzw. Holzwerkstoffes (in mm/min) und der geforderten Feuerwiderstandsdauer (in min) berechnet.

Alternativ können beim nicht verdeckten Einbau, also bei der Montage mit Schattenfuge, Brandschutzbänder verwendet werden (Bild 2.4 rechts). Diese Bänder werden entsprechend der Herstellerangaben und Brandschutzanforderungen rund um den Systemverbinder auf der Holzoberfläche angebracht. Ab einer Temperatur von 150–200°C schäumt das Band auf und bildet einen wärmeisolierenden Schaum. Somit werden die Verbinder vor direkter Temperatureinwirkung geschützt.



Bild 2.4: Links: Brandschutz von Verbindern durch Ummantelung mit Holz. Rechts: spezielles Brandschutzlaminat.

3 Kunstharzpressholz

3.1 Allgemeines

Bei Kunstharzpressholz (KPH) handelt es sich um geschichtete und mit duromeren Kunstharzen imprägnierte Buchenfurniere, die in hydraulischen Pressen unter hoher Temperatur und großem Druck verdichtet werden. KPH wird hauptsächlich in der Automobil- und Luftfahrtindustrie sowie im Anlagen- und Maschinenbau verwendet, aufgrund seiner hohen mechanischen Eigenschaften, seiner elektrischen Isolierfähigkeit und chemischen Beständigkeit.



Bild 3.1: Plattenrand von Kunstharzpressholz nach dem Pressen.

Als Furnier wird bevorzugt Buchenholz verwendet, da dieses leicht zu imprägnieren ist, eine hohe Querfestigkeit besitzt sowie in ausreichenden Mengen verfügbar ist. Es kommen überwiegend dünne Furniere mit Dicken von 0,4–2,1 mm zum Einsatz, um das Holzgefüge schnell und gleichmäßig mit Kunstharz zu tränken. Nach dem Zusammenlegen der

Furniere zu Paketen werden diese bei einem Druck von 100–250 bar und einer Temperatur von 135–165°C bis zum Erhärten der Harze gepresst. Dadurch entstehen Platten mit einer Rohdichte von bis zu 1400 kg/m^3 [2, 3].

3.2 Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften

In Versuchen wurden die Materialeigenschaften von KPH mit kreuzweise geschichteten Furnieren bestimmt [4]. Untersucht wurden dabei drei verschiedene Plattendicken t = 6 mm, 10 mm und 15 mm. Die Ergebnisse der Festigkeitseigenschaften und die der Steifigkeitseigenschaften sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Die Biege- und Zugfestigkeit in Plattenebene waren unabhängig von der Plattendicke weitgehend konstant, ebenso die Scherfestigkeit und der Schubmodul. Die Druckfestigkeit und der E-Modul in Plattenebene hingegen nahmen beide mit zunehmender Plattendicke ab.

3.3 Schraubenverbindungen in KPH

Für die Verwendung von KPH als Material für Systemverbinder wurden auch die Eigenschaften von Holzschrauben und metrischen Schrauben in KPH untersucht. Dazu wurde in Versuchen die jeweilige Herausziehtragfähigkeit verschiedener Schrauben aus KPH bestimmt. Ebenfalls wurden sowohl die Kopfdurchziehtragfähigkeit als auch die Lochleibungsfestigkeit mit unterschiedlichen Schrauben und Plattendicken ermittelt.

Tabelle 3.1: Übersicht der ermittelten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften (Mittelwerte in N/mm²).

Beanspruchung		Plattendicke		
		6 mm	10 mm	15 mm
Festigkeit				
Biegung flachkant, ∥	$f_{m,0,flat}$	113	103	110
Biegung flachkant, ⊥	$f_{m,90,flat}$	71,7	76,2	93,6
Biegung hochkant, ∥	$f_{m,0,edge}$	129	127	113
Biegung hochkant, ⊥	$f_{m,90,edge}$	119	112	127
Zug in Platte, ∥	$f_{t,0,edge}$	99,4	108	102
Zug in Platte, ⊥	$f_{t,90,edge}$	107	91,8	107
Druck in Platte, ∥	$f_{c,0,edge}$	97,2	96,9	80,5
Druck in Platte, ⊥	$f_{c,90,edge}$	90,1	88,9	88,5
Schub in Platte, ⊥	$f_{v,0,flat}$	10,1	9,83	9,86
Steifigkeit				
Biegung flachkant, ∥	$E_{m,0,flat}$	20.300	19.535	17.580
Biegung flachkant, ⊥	$E_{m,90,flat}$	11.785	12.920	13.345
Biegung hochkant, ∥	$E_{m,0,edge}$	17.005	16.620	14.330
Biegung hochkant, ⊥	$E_{m,90,edge}$	14.880	14.000	15.195
Zug in Platte, ∥	$E_{t,0,edge}$	15.120	15.920	13.240
Zug in Platte, ⊥	$E_{t,90,edge}$	14.180	14.720	14.830
Druck in Platte, ∥	$E_{c,0,edge}$	17.640	18.650	13.820
Druck in Platte, ⊥	$E_{c,90,edge}$	15.940	14.880	17.520
Schub in Platte, ⊥	$G_{0,flat}$	1.188	1.380	1.400

3.3.1 Herausziehtragfähigkeit

Bei der Bemessung maßgebend wird die Herausziehtragfähigkeit der geneigten Schrauben aus dem Haupt- bzw. Nebenträger aus Nadelholz. Jedoch wird die Abhebesicherung bei Belastungen entgegen der Einschubrichtung in die Verbinderplatte aus KPH geschraubt, weswegen die Herausziehtragfähigkeit aus KPH bestimmt wurde. Dazu wurden

zwei verschiedene Varianten untersucht. Zum einen Zylinderschrauben mit metrischem Gewinde nach DIN EN ISO 4762 [23], zum anderen Holzschrauben. Bei den Holzschrauben wurde unterschieden zwischen Schrauben vom Typ ASSYplus VG 4 mit Normalgewinde und Schrauben vom Typ ASSY 3.0 TG mit Grobganggewinde. Die Schrauben wurden alle mit Kerndurchmesser vorgebohrt und in die Schmalseite von KPH mit t = 25 mm eingedreht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 angegeben und in Bild 3.2 grafisch dargestellt. Für die Ø6 Schrauben wurde ab einer Einbindetiefe von 40 mm die Zugtragfähigkeit maßgebend, für die Ø8 Schrauben erst ab einer Einbindetiefe von 50 mm. Die maximale Einbindetiefe für die metrischen Schrauben war begrenzt auf die jeweilige Gewindelänge. Bei den Versuchen mit den Holzschrauben kam es schon bei den kleinsten geprüften Einbindetiefen zu Rissen im KPH, weswegen die Verwendung von metrischen Schrauben zur Abhebesicherung empfohlen wird.

Tabelle 3.2: Herausziehtragfähigkeit in Abhängigkeit der Einbindetiefe (Mittelwert in kN).

Schraubentyp		Einbindetiefe			
		10 mm	20 mm	30 mm	40 mm
M5	Metrisches Gewinde	5,13	8,07	-	-
M6	Metrisches Gewinde	-	-	13,1	-
M10	Metrisches Gewinde	-	-	-	28,2
6 mm	Normalgewinde	-	7,62	12,9	15,4
	Grobganggewinde	-	8,90	13,9	15,5
8 mm	Normalgewinde	-	8,57	14,7	21,0
	Grobganggewinde	-	7,17	13,4	19,4

3.3.2 Kopfdurchziehtragfähigkeit

Die Kopfdurchziehtragfähigkeit wurde systematisch an vier verschiedenen Plattendicken bestimmt. Für die Schraubendurchmesser wurden mit d = 6 mm und 8 mm gängige Durchmesser für aktuell handelsübliche Systemverbinder gewählt. Die Kopfdurchmesser waren d_{head} = 12 mm bzw. 15 mm. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 3.3 gegeben und in Bild 3.2 grafisch dargestellt. Ab einer KPH Dicke von t = 15 mm wurde für die Ø6 Schrauben die Zugtragfähigkeit maßgebend, bei den Ø8 Schrauben ab t = 25 mm.

Tabelle 3.3: Kopfdurchziehtragfähigkeit in Abhängigkeit der Plattendicke (Mittelwert in kN).

Schraubentyp		Plattendicke			
		6 mm	10 mm	15 mm	25 mm
6 mm	Senkfrästaschenkopf	4,55	8,93	15,0	15,6
8 mm	Senkfrästaschenkopf	5,16	10,6	20,7	24,5

3.3.3 Lochleibungsfestigkeit

Zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit wurden Versuche ebenfalls mit Schrauben d = 6 und 8 mm und den Plattendicken t = 6, 10 und 15 mm durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.4 zu sehen. Es ist ersichtlich, dass die Festigkeit mit zunehmender Plattendicke und Verbindungsmitteldurchmesser abnimmt. Aufgrund der Verformung der Verbindungsmittel bei einer Plattendicke von 15 mm ließ sich hierfür keine reine Lochleibungsfestigkeit mehr bestimmen. Für die weiteren Versuche und die spätere Bemessung wird angenommen, dass sich KPH in abscherbeanspruchten Verbindungen ähnlich wie Stahlblech verhält.

Tabelle 3.4: Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit von der Plattendicke (Mittelwerte in N/mm^2).

Schraubentyp		Plattendicke		
		6 mm	10 mm	15 mm
6 mm	Vollgewinde	296	231	-
8 mm	Vollgewinde	232	167	-

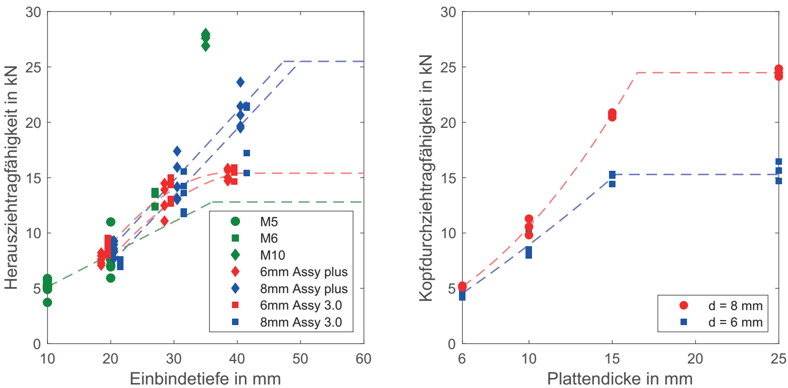


Bild 3.2: Herauszieh- und Kopfdurchziehtragfähigkeit von verschiedenen Schrauben.

3.4 Brandverhalten

Kunstharzpressholz ist ein Holzwerkstoff und daher grundsätzlich brennbar und muss also analog zu Nadelholz mindestens in die Klasse B (brennbare Baustoffe) nach DIN 4102 eingeteilt werden. Jedoch besitzt KPH sehr gute brandtechnische Eigenschaften. Haller et al. [5] haben Brandversuche mit verschiedenen Holzarten und auch KPH durchgeführt und die jeweilige Abbrandrate bestimmt. Aufgrund der hohen Rohdichte wurde eine Abbrandrate von KPH von etwa 0,3 mm/min ermittelt, die

von Nadelholz hingegen fast doppelt so hoch mit 0,5 mm/min, wie in Bild 3.3 zu sehen ist.

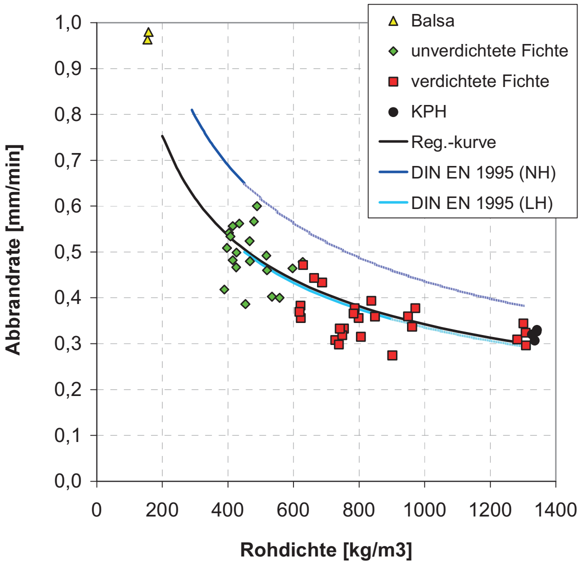


Bild 3.3: In Versuchen ermittelte Abbrandrate in Abhängigkeit der Rohdichte (Quelle: Haller et al. [5]).

Brandon et al. [6] untersuchten den Wärmeeintrag von metallischen und nicht-metallischen Verbindern und Knotenplatten. Die Versuche zeigten, dass deutlich weniger Wärme in die Verbindungen mit Stiften oder Knotenplatten aus KPH eingetragen wurde und der Abbrand somit wesentlich geringer ausfiel. In Bild 3.4 wird der Unterschied deutlich sichtbar.

Aufgrund der guten brandtechnischen Eigenschaften eröffnet sich die Möglichkeit, die Ummantelung des Systemverbinders mit KPH vorzunehmen. So kann der Verbinder um das Maß a_{fi} größer hergestellt werden und schützt sich selbst vor einem Abbrand und einer zu großen Erhitzung. Auch sind die Schrägschrauben effektiv vor einer Erhitzung geschützt.

Das arbeitsintensive Einfräsen der Verbinder für eine verdeckte Montage würde somit entfallen.

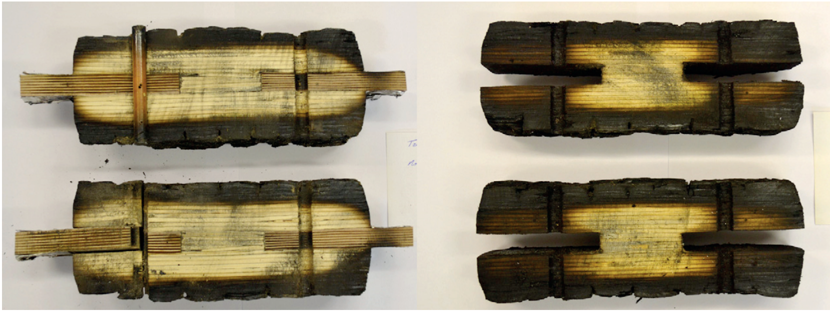


Bild 3.4: Schnitt durch eine Verbindung mit Knotenplatten aus KPH (links) und Stahl (rechts) nach 50 min Brandversuch (Quelle: Brandon et al. [6]).

4 Reibungsversuche mit behandelten Oberflächen

4.1 Allgemeines

Werden zwei aufeinanderliegende Körper relativ zueinander bewegt, entsteht in der Kontaktfläche zwischen diesen beiden Körpern Reibung. Das bedeutet, dass einer der beiden Körper solange in der Ruheposition bleibt, bis eine gewisse Kraft $F_{R,stat}$ überschritten wird. Ab diesem Zeitpunkt bewegt sich der Körper, angeschoben von der Kraft $F_{R,kin}$. Die Größe der Kraft $F_{R,stat}$ bzw. $F_{R,kin}$ hängen dabei von dem Reibungskoeffizienten ab.

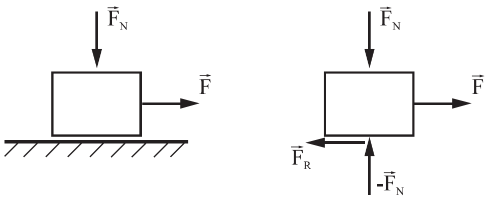


Bild 4.1: Ein Körper auf der Ebene, welcher durch Normal- und Tangentialkräfte beansprucht wird (Quelle: Popov [7]).

Der Reibungskoeffizient μ ist das dimensionslose Verhältnis von Reibungskraft F_R, parallel zur Kontaktfläche, zur Kraft F_N, rechtwinklig zur Kontaktfläche. Dabei wird zwischen den beiden zuvor beschriebenen Fällen unterschieden: Haftung beschreibt den Zustand des ruhenden

Körpers bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Körper anfängt sich zu bewegen und Gleitreibung beschreibt den Zustand, ab dem der Körper sich in Bewegung findet. Dies wurde ausführlich von dem französischen Physiker Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) untersucht und wird bis heute als *Coulombsche Reibung* bezeichnet.

- Haftung: um einen ruhenden Körper in Bewegung zu bringen, muss die statische Reibungskraft $F_{R,stat}$ überwunden werden. Diese kritische Kraft ist proportional zur Normalkraft F_N:

$$F_{\mathrm{R,stat}} = \mu_{\mathrm{s}} \cdot F_{\mathrm{N}} \tag{4.1}$$

- Gleitreibung: die kinetische Reibungskraft $F_{R,kin}$ ist die Widerstandkraft, die den Körper nach Überwindung der kritischen Kraft in Bewegung hält:

$$F_{\mathrm{R,kin}} = \mu_{\mathrm{k}} \cdot F_{\mathrm{N}} \tag{4.2}$$

mit μ_{s} statischer Reibungskoeffizient
μ_{k} kinetischer Reibungskoeffizient

Die Tragfähigkeit von ein- und mehrschnittigen Holz-Holz bzw. Stahl-Holz-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln wird im Allgemeinen nach der Theorie von Johansen [8] berechnet. Dabei darf, je nach Art des Verbindungsmittels, zusätzlich ein Anteil der Tragfähigkeit aufgrund von Reibung der zu verbindenden Bauteile angesetzt werden. Dieser Anteil aus Reibung wird, unabhängig vom Material und Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile, mit einem Reibungskoeffizienten von μ = 0,25 berechnet und als Seileffekt bezeichnet. Im Folgenden werden verschiedene Arten der Oberflächenbehandlung untersucht, um den Reibungskoeffizienten μ zwischen den Bauteilen deutlich zu erhöhen.

4.2 Oberflächenbehandlung

Um die Reibung in der Scherfuge zwischen Verbinder und Holzbauteil zu erhöhen und damit die Tragfähigkeit einer späteren Verbindung aufgrund eines höheren Seileffektes zu steigern, wurden verschiedene Arten der Oberflächenmodifizierung des KPH untersucht. Diese umfassten einfaches Schleifen bis zu aufwändigem Fräsen der Versuchskörper.

4.2.1 Glatt (unbehandelt)

Nach dem Pressen besitzt Kunstharzpressholz eine pressblanke Schicht, welche sehr glatt ist und einer lackierten Holz- oder Metalloberfläche ähnelt. Diese pressblanke Schicht weist jedoch stellenweise kleine Unebenheiten wie Blasenbildung auf, siehe Bild 4.2.

4.2.2 Geschliffen

Für diese Variante der Oberflächenbehandlung wurde die pressblanke Schicht der Versuchskörper abgeschliffen. Dies erfolgte vollflächig mit einem Bandschleifer und mit Schleifpapier mit einer Körnung P40. Der Schliff erfolgte dabei quer zur späteren Beanspruchungsrichtung während der Reibungsversuche. Durch das Schleifen konnte eine deutlich spürbare Strukturierung erreicht werden, wie in Bild 4.2 zu sehen ist.

4.2.3 Sandgestrahlt

In einer kleinen Sandstrahlkammer wurde jeder Versuchskörper ungefähr zwei Minuten pro Seite manuell sandgestrahlt. Dies hatte zur Folge, dass sich auf jeder Seite und jedem Versuchskörper leicht unterschiedliche Oberflächen einstellten. Beim Sandstrahlen konnte beobachtet

werden, dass das Frühholz der Furniere durch das Strahlgut abgetragen wurde und das Spätholz stehen blieb, siehe Bild 4.2. Dadurch erfolgte eine Strukturierung entlang der Faserrichtung der Deckfurniere und somit parallel zur späteren Beanspruchungsrichtung.

4.2.4 Gebürstet

Mit einer Topfbürste mit gezopftem Stahldraht wurde die glatte Oberfläche der Versuchskörper beidseitig gebürstet. Eine deutliche Strukturierung der Oberfläche ist in Bild 4.2 zu erkennen, jedoch war die Rauigkeit kaum spürbar. In Vorversuchen wurde auch nur ein sehr geringer Reibbeiwert ermittelt, weswegen diese Art der Oberflächenbehandlung nicht weiterverfolgt wurde. Das Prinzip des sich drehenden Werkzeugs wurde jedoch bei einem kreisförmig gefrästen Muster wieder aufgegriffen.



glatt (unbehandelt) | geschliffen | sandgestrahlt | gebürstet

Bild 4.2: Verschiedene Oberflächenbehandlungen.

4.2.5 Beschichtet

Für die Beschichtung wurden zwei unterschiedliche Arten von Klebstoff verwendet. Zum einen kam ein fließfähiger Zweikomponenten-Klebstoff zum Einsatz, der bei Raumtemperatur aushärtet. Zum anderen wurde ein Epoxidharz-Klebeband verwendet, welches bei Temperaturen von 130–170°C aushärtet. Beschichtet wurden die Versuchskörper mit Quarzsand mit einer Korngröße von 0–2 mm sowie mit Kiessplitt mit einer Korngröße von 2–4 mm (Bild 4.3). Außerdem wurde eine Versuchsreihe mit Skateboard-Griptape beschichtet. Griptape ist ein mit Sandkörnern beschichtetes Klebeband für die Oberseite von Skateboards, um einen festen Stand beim Fahren und eine bessere Kontrolle über das Skateboard zu haben.

Zweikomponenten-Klebstoff (2K-SE)

Verwendet wurde der Zweikomponenten-Universalklebstoff 2K SE-Polymer 690.00 von der Firma Jowat Klebstoffe, ein Hybridsystem aus Epoxidharzen und Silan-terminierten Polymeren. Die Oberfläche der Versuchskörper wurde vor dem Kleberauftrag sandgestrahlt. Die Verarbeitung des Klebstoffes erfolgt aus einer Zweikomponenten-Kartusche mit einem statischen Mischer, welcher für eine homogene Durchmischung der beiden Komponenten sorgte. Mit einer Aufbringlehre wurde sichergestellt, dass auf jede Seite eine Klebeschicht mit konstanter Dicke aufgebracht wurde. Für die Beschichtung mit Quarzsand 0-2 mm wurde eine 0,5 mm dicke Klebeschicht gewählt, für die Beschichtung mit Kiessplitt 2-4 mm eine 1,0 mm dicke Klebeschicht. Anschließend wurden die Versuchskörper manuell in die jeweilige Gesteinskörnung gedrückt. Gemäß den Herstellerangaben erfolgte eine Aushärtung bei Raumtemperatur für eine Woche.

Die beidseitige Aufbringung des Klebstoffes gestaltete sich schwieriger als gedacht, da der Klebstoff sehr flüssig war. Deshalb wurde der Kleber ca. 15 Minuten antrocknen gelassen, bevor die Versuchskörper in die Gesteinskörnung gepresst wurden.

Epoxidharz-Klebeband (EpoxyTape)

Aufbauend auf den Erfahrungen mit dem Flüssigkleber bezüglich dessen Verarbeitung und den späteren Versuchsergebnissen wurde nach einer Alternative gesucht. Diese wurde in Form von Epoxidharz-Klebeband der Firma Lohmann Tapes gefunden. Verwendet wurden das DuploTEC 10490 SBF–Epoxy Tape mit einer Klebeschichtdicke von 0,1 mm und das DuploTEC 10650 SBF–Epoxy Tape mit einer Klebeschichtdicke von 1,0 mm. Beide Klebebänder konnten bei Raumtemperatur appliziert werden und härteten dann im Ofen bei einer Temperatur zwischen 130–170°C aus. Als Gesteinskörnung wurde bei beiden Varianten mit Klebeband lediglich der Quarzsand 0–2 mm gewählt. Außerdem wurde der Quarzsand mit einem konstanten Anpressdruck von 2 N/mm^2 für zwei Minuten angepresst. Der klare Vorteil der Epoxidharz-Klebebänder ist die definierte Schichtdicke, der größte Nachteil ist die thermische Aushärtung.

Griptape

Verwendet wurde ein handelsübliches Griptape, welches für die Oberseite von Skateboards für eine bessere Haftung benutzt wird. Die Körnung des Griptape war deutlich feiner als die des Quarzsandes und ähnelte einem Schleifpapier, siehe Bild 4.3. Die Verarbeitung des Griptapes war deutlich einfacher als die der beiden Epoxidharz-Klebstoffe.



2K-SE und Quarzsand



Griptape



Quarzsand 0-2 mm



Kiessplitt 2-4 mm

Bild 4.3: Unterschiedlich beschichtetes KPH.

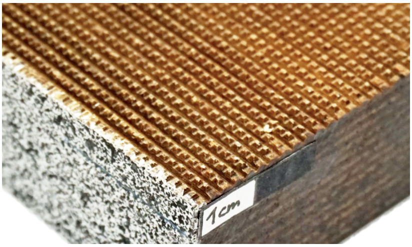
4.2.6 Gefräst

Untersucht wurden verschiedene Fräsmuster, die sich durch Verwendung unterschiedlicher Fräswerkzeuge ergaben. Verwendet wurden u.a. ein Fasenfräser für längs und quer angeordnete Nuten sowie ein Planfräser für kreisförmige Nuten.

Pyramiden-Muster

In Anlehnung an Girardon [9] wurden mittels einer programmierbaren NC-Fräse und einem Fasenfräser mit einem Kegelspitzenwinkel von 90° Längsnuten in die Decklage der Versuchskörper gefräst. Die Nuten in einem Versuchskörper waren alle gleich tief und hatten denselben Abstand zueinander. Daraufhin wurde der Versuchskörper um 90° gedreht und wieder parallele Quernuten in die Decklage gefräst, sodass kleine Pyramiden stehen blieben, welche eine sehr raue Oberfläche bildeten.

Hergestellt wurden Versuchskörper mit 0,5, 1, 1,5 und 2 mm tiefen Nuten. In Bild 4.4 sind beispielhaft Versuchskörper mit 0,5 mm tiefen Nuten und mit 2,0 mm tiefen Nuten zu sehen. Beim Fräsen der 0,5 mm tiefen Nuten ergab sich das Problem, dass die Pyramiden teilweise schon beim Herstellungsprozess abplatzten, weswegen die Quernuten daraufhin etwas tiefer gefräst wurden als die Längsnuten.



Pyramiden 0,5 mm tief.



Pyramiden 2,0 mm tief.

Bild 4.4: Unterschiedliche Pyramidenmuster.

Kreisförmiges Muster

Mit einem Planfräser, welcher sich mit einer konstanten Drehzahl drehte, wurde mit hohem Vorschub über die Oberfläche der Versuchskörper gefahren. Dadurch wurden kreisförmige Nuten in die Decklage des KPH gefräst, welche sich immer wieder schnitten. Dies hatte zur Folge, dass zum Rand der Versuchskörper hin Pyramiden-ähnliche Formen stehen blieben, während es in der Mitte der Versuchskörper längliche Nuten waren (siehe Bild 4.5).

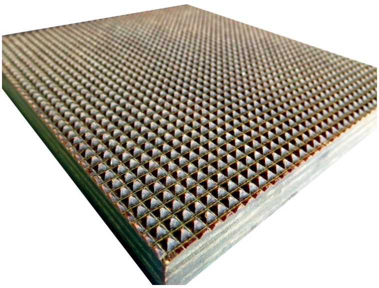
Schuppenmuster

Mit einem einfachen Fingerfräser, welcher um 5° geneigt war, wurden ähnlich zum Pyramidenmuster Längs- und Quernuten in die Oberfläche

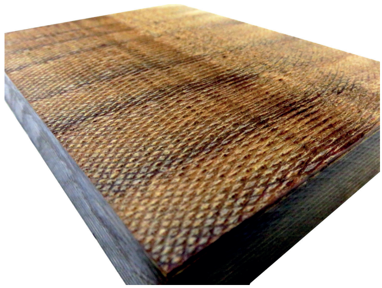
gefräst. Dadurch entstand ein Schuppenmuster, wie in Bild 4.5 zu sehen ist. In Vorversuchen wurde nur ein verhältnismäßig geringer Reibbeiwert ermittelt, weswegen diese Art der Oberflächenbehandlung nicht weiterverfolgt wurde.

4.2.7 Geprägt

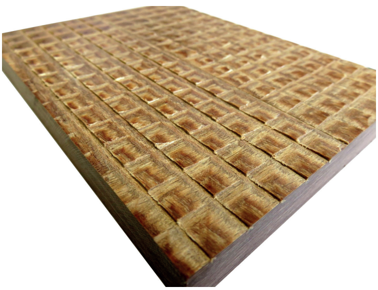
Analog zu dem gefrästen Pyramidenmuster wurden Längs- und Quernuten in eine Stahlplatte gefräst und diese dann in die Oberfläche des KPH gepresst. Die Pyramidenspitzen drangen dabei etwa 1 mm in die KPH Oberfläche ein. Es entstand ein geprägter Negativabdruck des Pyramidenmusters, wie in Bild 4.5 zu sehen ist.



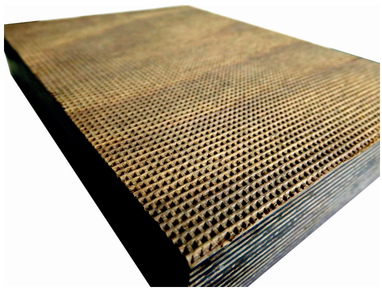
Pyramidenmuster



Kreisförmiges Muster



Schuppenmuster



Geprägte Oberfläche

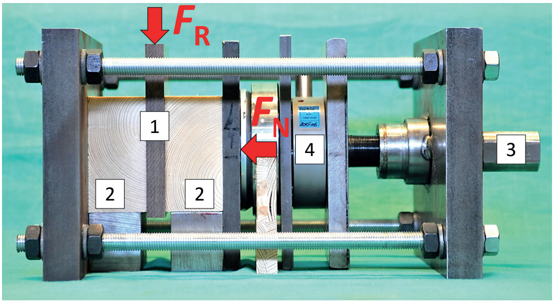
Bild 4.5: Unterschiedlich gefräste Oberflächen.

4.3 Versuche zur Bestimmung des Reibbeiwertes

4.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Versuche zur Ermittlung des Reibungskoeffizienten wurde der Versuchsaufbau von Schmidt [10] übernommen, siehe Bild 4.6. Das Versuchsgestell bestand aus zwei dicken Metallplatten die mit insgesamt vier Gewindestangen zusammengehalten wurden. An der einen Seite war eine Spindel an die Metallplatte angeschweißt. Durch diese Spindel wurde eine Gewindestange mit Feingewinde gedreht. Über diese Gewindestange wurde die Kraft F_N, rechtwinklig zur Reibfläche, aufgebracht. Aufgrund des Feingewindes konnte F_N sehr genau eingestellt werden. Während der Versuche wurde mit einer Kraftmessdose, welche direkt hinter die Gewindestange gesetzt war, die Kraft F_N kontinuierlich gemessen. Um F_N gleichmäßig auf die Reibfläche zu verteilen wurde eine Kalotte zwischen Kraftmessdose und Reibfläche angeordnet. Außerdem wurden die Nadelholzstücke auf Metallklötze gestellt, damit die Kraft F_N in der Schwerachse der Gewindestange mittig auf die Reibfläche wirkte. Die Reibkraft F_R, parallel zur Reibfläche, wurde über eine Universalprüfmaschine auf die Versuchskörper aus KPH aufgebracht. Der gesamte Versuchsablauf erfolgte weggesteuert bis zu einer Verschiebung von 15 mm.

Bei den Versuchen wurde unterschieden zwischen Seitenholz und Hirnholz des Nadelholzes, um die verschiedenen Einbausituationen der Verbinder nachzubilden. Der Kontakt mit Seitenholz tritt am Hauptträger auf, der Kontakt mit dem Hirnholz hingegen am Nebenträger. Des Weiteren wurde bei einigen Versuchen unterschieden zwischen Faserrichtung der Seitenhölzer parallel oder rechtwinklig zur Faserrichtung der Decklage des KPH bzw. der Beanspruchungsrichtung. Die unterschiedlichen Versuchskonfigurationen sind in Bild 4.7 zu sehen. Ebenso ersichtlich wird



1 Versuchskörper aus KPH mit behandelter Oberfläche
2 Seitenhölzer aus Nadelholz
3 Spindel mit Gewindestange zur Aufbringung von F_N
4 Kraftmessdose zur Messung von F_N

Bild 4.6: Versuchsaufbau für Reibungsversuche.

dabei die unterschiedliche Größe der Reibfläche, welches jedoch über die Kraft F_N berücksichtigt wurde und somit die Querdruckspannung in der Reibfläche zu Versuchsbeginn bei allen Versuchen gleich war. Für die Versuche mit Seitenholz betrug die Reibfläche 100x100 mm^2, für die Versuche mit Hirnholz betrug die Reibfläche 50x100 mm^2.

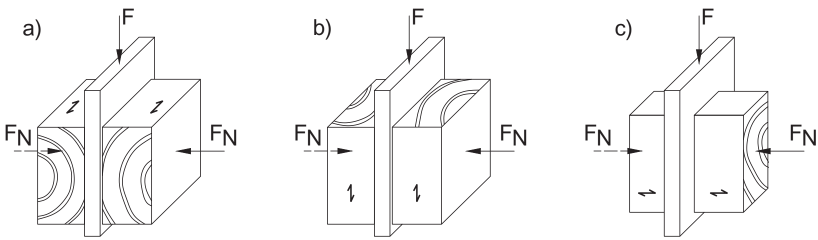
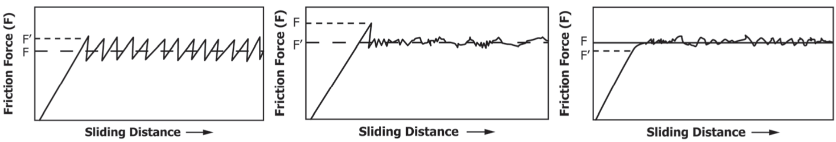


Bild 4.7: Faser- und Beanspruchungsrichtung bei den Reibungsversuche.

Zu Beginn wurden die Parameter Versuchsgeschwindigkeit und Normalspannung in der Reibfläche variiert, um den Einfluss dieser beiden Parameter zu bestimmen. Die Versuchsgeschwindigkeit wurde zwischen 1, 5 und 10 mm/min variiert, die Querdruckspannung zwischen 1, 2,5

und 6 N/mm^2. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde für die darauffolgenden Versuche eine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min und eine Querdruckspannung zu Versuchsbeginn von 2,5 N/mm^2 gewählt.

Der Reibungskoeffizient wurde nach Gleichung 4.1 berechnet. Dabei wurde die Kraft F_R, parallel zur Kontaktfläche gleichmäßig auf die beiden Reibflächen aufgeteilt. Der amerikanische ASTM Standard G115 [17] macht verschiedene Vorschläge für die zu verwendende Kraft F_R, je nach Verhalten der Oberfläche und Form der Kraft-Verformungskurve. Die drei unterschiedlichen Verhalten von Oberflächen sind in Bild 4.8 dargestellt. Links die Kraft-Verformungskurve für Oberflächen mit ausgeprägtem Stick-Slip-Verhalten. Dieses Wechseln der Ruhephase (Stick) und Gleitphase (Slip) kann zum einen auf stark unterschiedliche Steifigkeiten der sich berührenden Oberflächen in Kombination mit einer geringen Prüfgeschwindigkeit zurückgeführt werden und deutet zum anderen auf eine deutliche Differenz zwischen Haftung und Gleitreibung hin [11]. In Bild 4.8 mittig ist das Verhalten einer Oberfläche mit deutlicher Haftung zu sehen, welche größer als die Gleitreibung ist. Und rechts im Bild 4.8 ist das Verhalten einer Oberfläche zu sehen, bei der zwischen Haften und Gleiten keine große Haftkraft überwunden werden muss. Für die Berechnung des statischen Reibbeiwertes wird die Kraft *F'* empfohlen und für die Berechnung des kinetischen Reibbeiwertes die Kraft *F* (die Bezeichnungen *F* und *F'* im mittleren Bild sind im ASTM Standard G115 falsch angegeben und müssen vertauscht werden).



Stick-Slip-Verhalten | Deutliche Haftkraft | Haftreibung ≈ Gleitreibung

Bild 4.8: Unterschiedliche Kraft-Verformungskurven je nach Verhalten der Oberfläche.

Tabelle 4.1: Übersicht über das Versuchsprogramm.

Reihe	Oberfläche	Anzahl Versuche *n*		
		SH ⊥	SH ‖	HH
1	Unbehandelt	31	-	27
2	Geschliffen	6	-	6
3	Sandgestrahlt	6	-	6
4	Beschichtet mit 2K-SE + Quarzsand	3	-	3
5	Beschichtet mit 2K-SE + Kiessplit	3	-	3
6	Beschichtet mit EpoxyTape (0,1 mm)	3	-	3
7	Beschichtet mit EpoxyTape (1,0 mm)	3	-	3
8	Beschichtet mit Griptape	3	-	4
9	Gefräst 0,5 mm Pyramidenmuster	40	10	30
10	Gefräst 1,0 mm Pyramidenmuster	15	20	10
11	Gefräst 1,5 mm Pyramidenmuster	20	19	18
12	Gefräst 2,0 mm Pyramidenmuster	12	-	-
13	Gefräst kreisförmig	14	20	13
14	Gefräst Schuppenmuster	7	2	-
15	Geprägt	30	10	21
16	Aluminium	12	-	12

SH = Seitenholz und HH = Hirnholz

4.3.2 Ergebnisse

Parameterstudie

Die Auswertung der Versuche mit den nicht behandelten Versuchskörpern, bei denen die Parameter Anpressdruck und Prüfgeschwindigkeit geändert wurden, zeigen keine Abhängigkeit des Reibbeiwertes von der Querdruckspannung in der Reibfläche als auch von der Prüfgeschwindigkeit. Wie in Bild 4.9 zu sehen ist, nimmt der Reibbeiwert mit zunehmenden Anpressdruck und Prüfgeschwindigkeit unmerklich ab.

Zusätzlich wurde auch der Einfluss der Rohdichte der Nadelhölzer untersucht. In Bild 4.9 sind ebenfalls die Ergebnisse beispielhaft für die gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster und geprägter Oberfläche dargestellt. Sowohl bei den Versuchen mit Pyramidenmuster als auch mit dem geprägten KPH ist kein Einfluss der Rohdichte des Nadelholzes auf den Reibbeiwert zu erkennen.

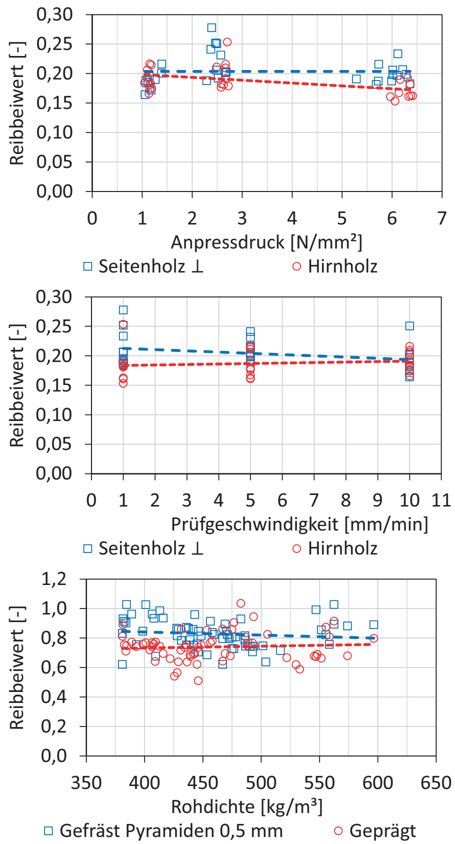


Bild 4.9: Einfluss von Anpressdruck, Prüfgeschwindigkeit und Rohdichte auf den Reibbeiwert.

Unbehandelt, glatt

Bei den Versuchen mit unbehandeltem KPH wurde besonders bei Versuchen mit Seitenholz und geringer Prüfgeschwindigkeit (v = 1 mm/min) ein deutlich ausgeprägtes Stick-Slip-Verhalten festgestellt, siehe Bild 4.10 links. Hierzu im Vergleich in Bild 4.10 rechts der Verlauf für einen Versuch mit Hirnholz und einer Prüfgeschwindigkeit von v = 10 mm/min. Der Mittelwert der Versuche mit Seitenholz lag bei μ_s = 0,20 und auch die Versuche mit Hirnholz kamen im Mittel nur auf μ_s = 0,19. Damit lagen beide Mittelwerte sogar niedriger als der Wert 0,25, der nach Eurocode 5 [21] für den Seileffekt angesetzt werden darf.

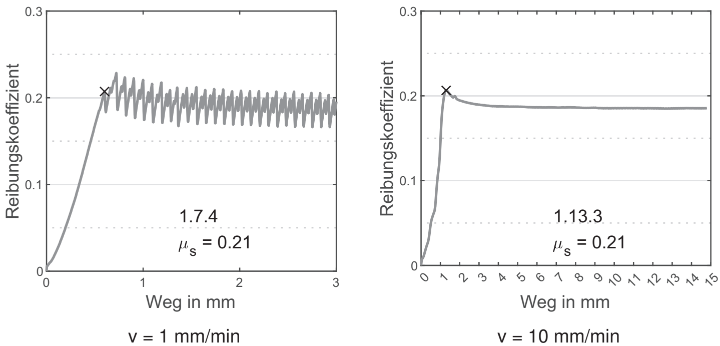


Bild 4.10: Unterschiedliche Kurven für unterschiedliche Prüfgeschwindigkeiten.

Bei keinem der Versuche mit einer Querdruckspannung von σ_N = 1 bzw. 2,5 N/mm^2 kam es während der Versuche zu einer Beschädigung des KPH oder des Nadelholzes. Bei den Versuchen mit einer Spannung von σ_N = 6 N/mm^2 hingegen versagte das Nadelholz auf Querdruck, so dass die Größe der KPH Versuchskörper auf Streifen mit 25 mm Breite reduziert wurde. Dadurch kam es zwar weiterhin zu einem Querdruckversagen des Nadelholzes, aber die mitwirkende Faserlänge konnte deutlich erhöht und ein Reibbeiwert ermittelt werden.

Tabelle 4.2: Ergebnisse Versuchsreihe 1 mit unbehandeltem KPH.

		Seitenholz ⊥	Hirnholz
Mittelwert	MEAN	0,20	0,19
Standardabweichung	SD	0,03	0,02
Variationskoeffizient	COV	13%	12%

Geschliffen

Bei den Versuchen mit geschliffener Oberfläche blieben die Probekörper aus KPH unbeschadet. Das Nadelholz wies geringfügige Schleifspuren auf und in den Schleifrillen des KPH war deutlich feines, sägemehlartiges Pulver der Nadelhölzer vorzufinden. Bei den Versuchen mit Hirnholz trat dies nicht auf. Die Mittelwerte verdoppelten sich sowohl für die Versuche mit Seitenholz als auch für die Versuche mit Hirnholz und berechneten sich zu μ_s = 0,56 bzw. μ_s = 0,47.

Sandgestrahlt

Auch bei den Versuchen mit sandgestrahltem KPH konnte feines Holzmehl in den Vertiefungen der Oberfläche festgestellt werden. Dieses haftete jedoch nicht am KPH und ließ sich durch leichtes darüberstreichen entfernen. Die Mittelwerte des Reibbeiwertes lagen bei μ_s = 0,49 für Seitenholz und μ_s = 0,47 für Hirnholz.

Beschichtet mit fließfähigem Epoxidharz-Klebstoff (2K-SE)

Bei den Versuchen konnte vor allem ein adhäsives Versagen der Beschichtung beobachtet werden, das heißt, der Kleber löste sich vom KPH. Diese Beobachtung war unabhängig von der Korngröße der Beschichtung. Da sowohl die Oberfläche des KPH vor dem Kleben sandgestrahlt

Tabelle 4.3: Ergebnisse Reihe 2 mit geschliffenem KPH und Reihe 3 mit sandgestrahltem KPH.

	Geschliffen		Sandgestrahlt	
	Seitenholz ⊥	Hirnholz	Seitenholz ⊥	Hirnholz
MEAN	0,56	0,47	0,49	0,47
SD	0,08	0,09	0,07	0,06
COV	14%	19%	15%	13%

war, als auch die Aushärtezeiten des Herstellers eingehalten wurden, lässt sich das Versagen nur mit einer zu dicken Klebeschichtdicke erklären. Die mineralische Körnung presste sich während den Versuchen in die Nadelhölzer ein, beschädigte diese und blieb teilweise auch nach Versuchsende darin haften. Bei den Versuchen mit Seitenholz war dies stärker ausgeprägt als bei denen mit Hirnholz. In Bild 4.11 sind zwei beschichtete Versuchskörper jeweils nach dem Versuch zu sehen, sowie ein Stück Seitenholz mit eingepresstem Kiessplitt.

Die ermittelten Werte für den Reibungskoeffizienten lagen für die Versuche mit Seitenholz bei μ_s = 0,64 für die Beschichtung mit Quarzsand 0–2 mm und bei μ_s = 0,61 für die Beschichtung mit Kiessplitt 2–4 mm. Für die Versuche mit Hirnholz konnte für die Beschichtung mit Quarzsand ein Mittelwert von μ_s = 0,54 und für die Beschichtung mit Kiessplitt ein Mittelwert von μ_s = 0,69 ermittelt werden. Auf Grund des Versagens des Klebstoffes ließ sich nicht der tatsächliche Reibbeiwert ermitteln, sondern nur eine Untergrenze des Haftungskoeffizienten zu dem Zeitpunkt, an dem der Kleber versagte.

Beschichtet mit Epoxidharz-Klebeband (EpoxyTape)

Bei dem Klebeband mit einer Klebeschichtdicke von 0,1 mm kam es während der Versuche ebenfalls zu adhäsivem Versagen. Die Verzahnung

Tabelle 4.4: Ergebnisse Versuchsreihen 4 und 5 mit 2K-SE beschichtetem KPH.

	Quarzsand 0–2 mm		Kiessplit 2–4 mm	
	Seitenholz ⊥	Hirnholz	Seitenholz ⊥	Hirnholz
MEAN	0,64	0,54	0,61	0,69
SD	0,08	0,07	0,05	0,04
COV	13%	12%	9%	5%



Bild 4.11: Adhäsives Versagen der Beschichtung, sowie eingepresste mineralische Körnung in das Seitenholz.

zwischen dem Nadelholz und dem Quarzsand war jedoch so stark, dass sich nur vereinzelte Stellen des Klebebandes vom KPH lösten, wie in Bild 4.12 links zu sehen ist. Eine besonders hoher Grad der Verzahnung konnte beim Hirnholz festgestellt werden. Bei den Versuchen mit dem Klebeband mit einer Schichtdicke von 1,0 mm kam es zu kohäsivem Versagen. Die Mineralkörner der Beschichtung pressten sich in das Nadelholz ein, blieben dort haften und wurden vom Klebemittel getrennt. Dieses Ablösen der Mineralkörner vom Klebeband ist deutlich in Bild 4.12 rechts zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigten deutlich höhere Reibbeiwerte als mit dem pastösen Epoxidharz ermittelt wurden. So ergaben die Versuche mit Seitenholz Mittelwerte von μ_s = 0,82 für das 0,1 mm dicke Klebeband und μ_s = 0,74 für das 1,0 mm dicke Klebeband. Die Ergebnisse der Versuche

mit Hirnholz ergaben beides Mal noch höhere Reibbeiwerte mit μ_s = 0,97 für das dünne Klebeband und μ_s = 0,82 für das dicke Klebeband.

Tabelle 4.5: Ergebnisse Versuchsreihen 6 und 7 mit EpoxyTape beschichtetem KPH.

	Klebeschichtdicke 0,1 mm		Klebeschichtdicke 1,0 mm	
	Seitenholz ⊥	Hirnholz	Seitenholz ⊥	Hirnholz
MEAN	0,82	0,97	0,74	0,82
SD	0,10	0,12	0,03	0,05
COV	12%	12%	4%	6%



0,1 mm 1,0 mm

Bild 4.12: Unterschiedliches Versagen des Klebebandes mit Klebeschichtdicke von 0,1 mm und 1,0 mm.

Beschichtet mit Griptape

Die Oberfläche des Griptapes war sehr rau, ähnlich einem Schleifpapier. Jedoch konnte bei den Versuchen kein genauer Reibbeiwert ermittelt werden, da auch bei dieser Art der Beschichtung ein adhäsives Versagen des Klebstoffes auftrat. Wie in Bild 4.13 deutlich zu sehen ist, löste sich das Griptape vollständig vom KPH und verschob sich entlang der Reibfläche. So konnten lediglich Reibungskoeffizienten von μ_s = 0,24

und μ_s = 0,32 für die Versuche mit Seitenholz bzw. mit Hirnholz ermittelt werden.

Tabelle 4.6: Ergebnisse Versuchsreihe 8 mit Griptape beschichtetem KPH.

	Seitenholz ⊥	Hirnholz
MEAN	0,24	0,32
SD	0,02	0,13
COV	9%	40%

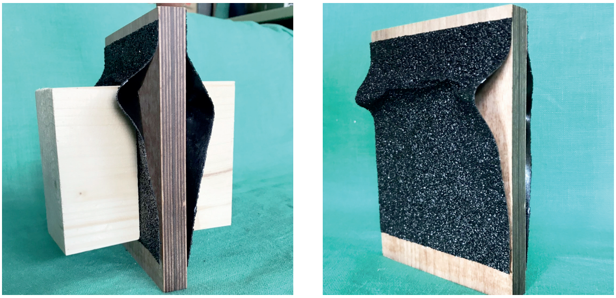
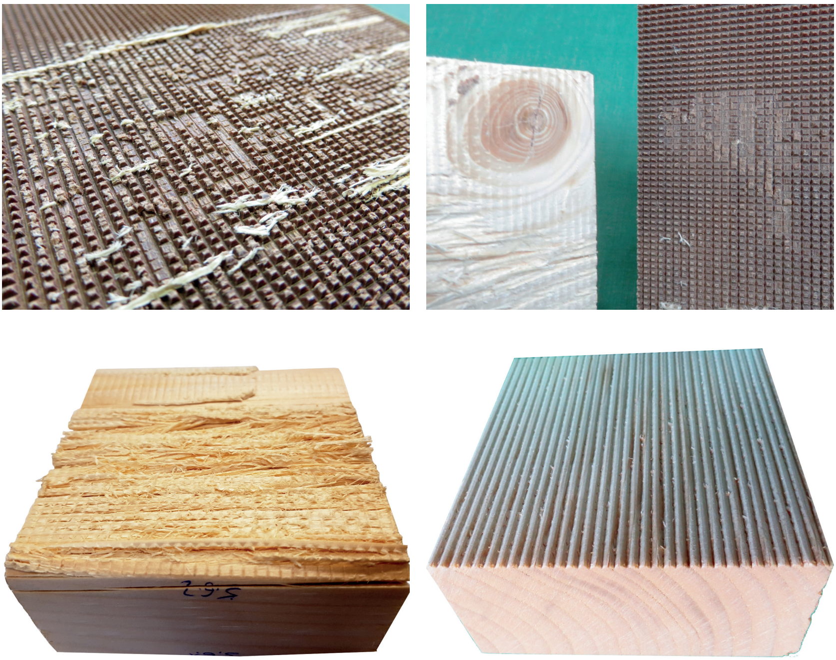


Bild 4.13: Adhäsives Versagen der Beschichtung.

Gefräst mit Pyramidenmuster

Für alle vier untersuchten Pyramidenmuster waren die Ergebnisse für die Reibbeiwerte für Seitenholz ⊥ mit μ_s = 0,84 (0,5 mm), 0,94 (1,0 mm), 1,06 (1,5 mm) und 1,15 (2,0 mm) deutlich höher als für die bisher gezeigten Oberflächenbehandlungen. In Tabelle 4.7 sind die weiteren Ergebnisse für die Versuche mit Seitenholz ‖ und Hirnholz angegeben. Bei den kleinen Pyramiden mit 0,5 mm Tiefe kam es zu einem Abscheren der Pyramiden parallel zur Belastungsrichtung. Zwei solche beschädigte KPH-Oberflächen sind in Bild 4.14 oben zu sehen. Auch war auf Grund der sehr starken Verzahnung der Pyramiden mit dem weichen Nadelholz

eine sehr starke Abnutzung der Nadelholz Oberflächen zu beobachten. Dies war besonders stark bei den Versuchen mit Seitenholz ⊥ zur Belastungsrichtung (4.14 unten links). Hier löste sich das Frühholz, in welches die Pyramiden eingepresst waren, entlang der Jahrringe vom darunterliegenden Spätholz. Dies war je nach Jahrringlage unterschiedlich stark ausgeprägt, wurde jedoch nicht weiter systematisch untersucht. Bei den Versuchen mit Seitenholz parallel zur Belastungsrichtung kam es nicht zu so einer starken Verzahnung, wie auch an den Seitenhölzern zu erkennen ist, siehe 4.14 unten rechts. Ein Abschälen des Nadelholzes konnte bei den Versuchen mit Hirnholz ebenfalls nicht beobachtet werden.



Seitenholz ⊥ | Seitenholz ||

Bild 4.14: Abscheren der Pyramiden (oben) und Seitenhölzer nach Versuchen (unten).

Tabelle 4.7: Ergebnisse Versuchsreihen 9 bis 12 mit Pyramidenmuster.

	Seitenholz $\perp$	Seitenholz $\parallel$	Hirnholz
MEAN (0,5 mm)	0,84	0,82	0,82
SD	0,11	0,05	0,08
COV	14%	6%	10%
MEAN (1,0 mm)	0,94	0,88	0,80
SD	0,10	0,12	0,13
COV	11%	14%	16%
MEAN (1,5 mm)	1,06	1,03	1,06
SD	0,11	0,16	0,11
COV	11%	16%	10%
MEAN (2,0 mm)	1,15	-	-
SD	0,15	-	-
COV	13%	-	-

Gefräst mit kreisförmigen Muster

Die ermittelten Mittelwerte waren μ_s = 0,89 für Seitenholz $\perp$ und μ_s = 0,82 für Hirnholz. Etwas geringer waren die Ergebnisse für Seitenholz $\parallel$ mit μ_s = 0,78. Bereits durch den Fräsvorgang war die Oberfläche an einzelnen Stellen, vor allem zum Rand hin, recht glatt gefräst und nur in der Mitte war ein Bereich mit einer scharfen, länglichen Nut. In diesem Bereich der Oberfläche konnten Abreibungen des Nadelholzes festgestellt werden, siehe Bild 4.15.

Geprägt

Für die geprägte Oberfläche konnten Mittelwerte von μ_s = 0,79 für Seitenholz $\perp$ und μ_s = 0,71 für Hirnholz bestimmt werden. Auch hier lag der

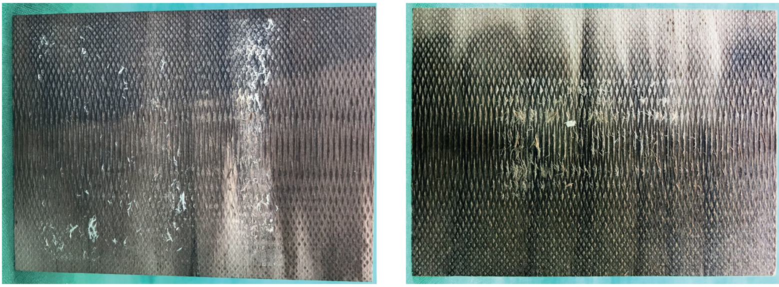


Bild 4.15: Kreisförmig gefräste Oberfläche nach den Versuchen.

Tabelle 4.8: Ergebnisse Versuchsreihe 13 mit kreisförmig gefrästem KPH.

	Seitenholz ⊥	Seitenholz ‖	Hirnholz
MEAN	0,89	0,78	0,82
SD	0,12	0,08	0,08
COV	14%	10%	10%

Reibbeiwert für Seitenholz ‖ mit μ_s = 0,67 etwas geringer. Erstaunlich zu beobachten war bei der geprägten Oberfläche, dass es trotz der flachen Oberfläche, ohne hervorstehende Strukturierung, zu einer deutlichen Zerstörung der Oberfläche des Nadelholzes während der Versuche gekommen ist (Bild 4.16 links). Ebenfalls deutlich zu erkennen in Bild 4.16 rechts ist der Einfluss von bereits sehr kleinen Ästen auf die Oberfläche und die zerstörerische Wirkung durch die lokal sehr hohe Rohdichte des Seitenholzes.

Tabelle 4.9: Ergebnisse Versuchsreihe 15 mit geprägtem KPH.

	Seitenholz ⊥	Seitenholz ‖	Hirnholz
MEAN	0,79	0,67	0,71
SD	0,10	0,09	0,06
COV	13%	13%	8%

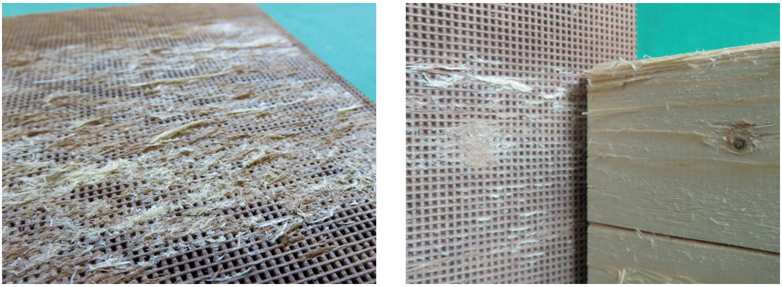


Bild 4.16: Geprägte Oberfläche nach den Versuchen.

Eloxiertes Aluminium

Zum Bewerten der behandelten Oberflächen wurden auch Reibversuche mit eloxiertem Aluminium durchgeführt, so wie es für handelsübliche Systemverbinder verwendet wird. Die Ergebnisse lagen im Mittel bei μ_s = 0,38 für die Versuche mit Seitenholz und bei μ_s = 0,43 für die Versuche mit Hirnholz. Es ist also ersichtlich, dass jede Art der zuvor untersuchten Oberflächenbehandlungen von KPH bereits höhere Reibbeiwerte liefert (mit Ausnahme der Beschichtung mit Griptape).

Tabelle 4.10: Ergebnisse Versuchsreihe 16 mit eloxiertem Aluminium.

	Seitenholz $\perp$	Hirnholz
MEAN	0,38	0,43
SD	0,07	0,03
COV	12%	12%

4.3.3 Charakteristische Werte

Die Berechnung der charakteristischen Werte (5%-Quantil) erfolgte in Anlehnung an DIN EN 14358 [19] unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung nach Gleichung 4.3:

$$m_{\mathrm{k}} = \exp(\overline{y} - k_{\mathrm{s}}(n) s_{\mathrm{y}}) \tag{4.3}$$

mit m_k charakteristischer Wert der Stichprobe
$\overline{y}$ Mittelwert
k_s(n) statistischer Wert nach Gl. 4.4
s_y Standardabweichung

$$k_{\mathrm{s}}(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3} \tag{4.4}$$

Nach DIN EN 14545 [20] darf der charakteristische Wert unter Anwendung eines globalen Variationskoeffizienten COV_g berechnet werden, welcher auf Grundlage aller Prüfergebnisse *n* beruht. Ebenfalls darf k_s(n) mit der gleichen Anzahl *n* von Ergebnissen berechnet werden. COV_g berechnet sich nach Gleichung 4.5:

$$COV_{\mathrm{g}} = \sqrt{\frac{\sum((n_{\mathrm{i}} - 1)(s_{\mathrm{y,i}})^2)}{(\sum n_{\mathrm{i}} - J)}} \geq 0,05 \tag{4.5}$$

mit n_i Anzahl Versuchsergebnisse je Oberfläche und Faserrichtung
$s_{y,i}$ Standardabweichung je Oberfläche und Faserrichtung
J Anzahl der Versuchsreihen

Insgesamt wurden $n = 467$ Reibungsversuche durchgeführt. Der globale Variationskoeffizient berechnete sich nach Gl. 4.5 zu COV_g = 0,10 und der statistische Wert nach Gl. 4.4 zu k_s(n) = 1,76. In der nachfolgenden

Tabelle 4.11 sind für alle untersuchten Oberflächen und Faserrichtungen die charakteristischen Werte zu den dazugehörigen Mittelwerten angegeben. Es zeigt sich, dass auch die 5%-Quantilwerte allesamt deutlich über dem Wert von μ = 0,25 aus dem Eurocode 5 liegen.

Tabelle 4.11: Übersicht über alle ermittelten Reibungskoeffizienten: Mittelwerte und charakteristische Werte.

Oberfläche	Statischer Reibungskoeffizient					
	SH ⊥		SH ‖		HH	
	MW	char.	MW	char.	MW	char.
Glatt	0,20	0,17	-	-	0,19	0,16
Geschliffen	0,56	0,47	-	-	0,47	0,40
Sandgestrahlt	0,49	0,41	-	-	0,47	0,40
Gebürstet	0,40	-	-	-	-	-
Beschichtet mit 2K-SE + Quarzsand	0,64	0,54	-	-	0,54	0,46
Beschichtet mit 2K-SE + Kiessplit	0,61	0,52	-	-	0,69	0,58
Beschichtet mit EpoxyTape (0,1 mm)	0,82	0,69	-	-	0,97	0,82
Beschichtet mit EpoxyTape (1,0 mm)	0,74	0,63	-	-	0,82	0,69
Beschichtet mit Griptape	0,24	0,20	-	-	0,32	0,27
Gefräst 0,5 mm Pyramidenmuster	0,84	0,71	0,82	0,69	0,82	0,69
Gefräst 1,0 mm Pyramidenmuster	0,94	0,79	0,88	0,74	0,80	0,68
Gefräst 1,5 mm Pyramidenmuster	1,06	0,90	1,03	0,87	1,06	0,90
Gefräst 2,0 mm Pyramidenmuster	1,15	0,97	-	-	-	-
Gefräst kreisförmig	0,89	0,75	0,78	0,66	0,82	0,69
Gefräst Schuppenmuster	0,66	0,56	0,55	0,46	-	-
Geprägt	0,79	0,67	0,67	0,57	0,71	0,60
Aluminium	0,38	0,32	-	-	0,43	0,36

SH = Seitenholz und HH = Hirnholz

4.4 Zusammenfassung

Es wurden insgesamt 18 verschiedene Oberflächen untersucht, welche alle unterschiedlich hergestellt wurden. Es zeigte sich für alle Oberflächenbehandlungen eine deutliche Erhöhung des Reibungskoeffizienten im Vergleich zu der unbehandelten Oberfläche und der Aluminiumoberfläche herkömmlicher Systemverbinder. Auch lagen die charakteristischen Werte für alle Oberflächen deutlich über dem Wert von μ = 0,25 aus dem Eurocode 5.
Die Versuche haben gezeigt, dass für beschichtete Oberflächen möglichst dünne Klebeschichtdicken zu empfehlen sind. Ebenfalls sind eine möglichst feine Mineralkörnung zu bevorzugen. Hier sollten weitere Versuche mit einer Korngröße $\leq$ 0–2 mm durchgeführt werden, wie zum Beispiel eine Beschichtung mit Korund.
Die Versuche mit den gefrästen Oberflächen haben gezeigt, dass vor allem mit dem Pyramidenmuster sehr hohe Reibbeiwerte ermittelt werden konnten. Außerdem stieg der Reibbeiwert mit größer werdenden Pyramiden. Ebenfalls ersichtlich wurde bei der gefrästen Oberflächenbehandlung, dass zu geringe Nutentiefen zu einem Abplatzen der gefrästen Muster bereits bei der Herstellung führten. Somit sind Frästiefen von $\geq$ 1 mm zu empfehlen.
Die Versuche mit der geprägten Oberfläche, also dem Negativabdruck des Pyramidenmusters, haben hingegen gezeigt, dass auch mit vermeintlich flachen Oberflächen eine deutliche Erhöhung des Reibungskoeffizienten möglich ist.

5 Druck-Scher-Versuche mit geneigten Schrauben

5.1 Übersicht

Aufbauend auf den Reibungsversuchen wurden in einer ersten Versuchsreihe Versuche mit einfachen KPH-Verbindern mit modifizierter Oberfläche durchgeführt, bei denen die Kraft zwischen den beiden Verbinderteilen lediglich über Druckkontakt übertragen wurde. Hierbei ging es zunächst darum zu untersuchen, ob mit geneigt eingedrehten Schrauben in einer späteren Einbausituation ein ausreichend hoher Anpressdruck in der Kontaktfläche erzeugt werden kann und somit die zuvor ermittelten Reibungskoeffizienten auftreten. Des Weiteren wurde untersucht, in welchem Maße sich die Steigerung des Reibbeiwertes der Oberfläche auf die Steigerung der Tragfähigkeit der Verbindung auswirkt.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die Position der Schrauben geändert sowie nur noch zwei gefräste Oberflächen untersucht. Der Schraubentyp und die -anzahl blieben jedoch gleich. Anschließend daran wurde in der dritten Versuchsreihe der Schraubentyp verändert und längere Schrauben gewählt, sodass die Zugtragfähigkeit der Schrauben maßgebend wurde. Auch hier wurden nur noch zwei gefräste Muster untersucht. Mit der Erhöhung der Schraubenanzahl in der vierten Versuchsreihe wurde das Verhalten der Verbinder mit einer größeren Schraubengruppe untersucht. Es sollte überprüft werden, ob bei der großen Anzahl von

sehr dicht zueinander angeordneten Schrauben auch Blockscherversagen bei der späteren Bemessung zu berücksichtigen ist. In einer weiteren fünften Versuchsreihe wurden auch hier noch Versuche mit längeren Schrauben durchgeführt.

In Reihe 6 wurden zum ersten Mal zwei Prototypenverbinder aus KPH mit gefräster Oberfläche untersucht. Zum Schluss wurde in Reihe 7 ein Prototyp für einen Schwerlastverbinder für Kräfte bis 500 kN getestet. Eine Übersicht aller durchgeführten Druck-Scher-Versuche ist in Tabelle 5.1 gegeben. Die Anzahl der Schrauben ist angegeben pro Verbinderplatte und Scherfuge.

5.2 Vorversuche

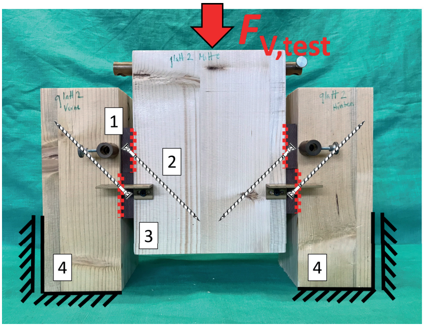
5.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau kann Bild 5.1 entnommen werden. Die genauen Angaben zu den Maßen der Versuchskörper können dem Anhang entnommen werden. Die KPH-Verbinder wurden jeweils nur auf einer Seite modifiziert und mit geneigt eingedrehten Schrauben an Seiten- bzw. Mittelhölzern aus Nadelholz befestigt. Als Schrauben wurden für Reihe 1 und 2 Vollgewindeschrauben HECO-TOPIX [25] und für die weiteren Reihen 3 bis 7 Vollgewindeschrauben Würth ASSYplus VG 4 [24] verwendet. Die Schrauben waren bei allen Versuchen um 45° geneigt eingedreht. Belastet wurden die Versuchskörper mit einer Universalprüfmaschine. Während des Versuchsablaufs wurden sowohl die Maschinenkraft als auch die Relativverschiebung zwischen Mittel- und Seitenholz gemessen. Gemessen wurde die Relativverschiebung an jedem Verbinder an der Vorder- und Rückseite der Versuchskörper. Für Versuchsreihe 1 wurden dafür induktive Wegaufnehmer verwendet, für alle weiteren Versuchsreihen wurde die Verformung mithilfe digitaler Bildkorrelation (DIC)

Tabelle 5.1: Übersicht über die durchgeführten Druck-Scher-Versuche.

Reihe	Versuche	Oberfläche	Schraubentyp/-anzahl	
1	3	Glatt	5x100	5
	3	Geschliffen	5x100	5
	3	Sandgestrahlt	5x100	5
	3	Beschichtet mit EpoxyTape (0,1 mm)	5x100	5
	3	Beschichtet mit EpoxyTape (1,0 mm)	5x100	5
	3	Beschichtet mit Griptape	5x100	5
	3	Gefräst Pyramiden 1,0 mm	5x100	5
	3	Gefräst Pyramiden 1,5 mm	5x100	5
	3	Gefräst Pyramiden 2,0 mm	5x100	5
	3	Gefräst kreisförmig	5x100	5
2	5	Gefräst Pyramiden 1,0 mm (variiert)	5x100	5
	5	Gefräst Pyramiden 1,5 mm (variiert)	5x100	5
3	5	Gefräst Pyramiden (0,5 mm)	6x180	5
	5	Gefräst kreisförmig	6x180	5
4	5	Gefräst Pyramiden (0,5 mm)	6x100	15
	5	Geprägt	6x100	15
5	3	Geprägt	6x200	15
6	8	Gefräst Pyramiden (0,5 mm)	6x200	10
	7	Gefräst Pyramiden (1,0 mm)	6x200	12
7	5	Gefräst Pyramiden (1,0 mm)	8x300	20

gemessen. Der Versuchsablauf und die Auswertung erfolgten in Anlehnung an DIN EN 26891 [22]. Es wurden sowohl die Höchstlast $F_{V,test}$ als auch die Steifigkeit k_s je Verbinder ermittelt. Die Steifigkeit wurde im Bereich zwischen 10% und 40% der Höchstlast im linear-elastischen Bereich ermittelt.



1 Verbinder aus KPH mit behandelter Oberfläche
2 Vollgewindeschrauben um 45° geneigt
3 Mittelholz aus Nadelholz
4 Seitenholz aus Nadelholz

Bild 5.1: Versuchsaufbau für Druck-Scher-Versuche mit geneigten Schrauben.

5.2.2 Ergebnisse und Diskussion

5.2.2.1 Reihe 1

Die aufgetretenen Versagensarten waren entweder ein Zugversagen einer oder mehrerer Schrauben in der Scherfuge oder ein Herausziehen der Schrauben aus dem Nadelholz. Die Versuche mit Verbindern mit glatter und geschliffener Oberfläche sowie beschichtet mit dickem Epoxidharz-Klebeband und Quarzsand versagten alle aufgrund des Erreichens der Zugtragfähigkeit der Schrauben, siehe Bild 5.2 links. Die Versuche mit den Verbindern mit kreisförmigen Muster und beschichtet mit Griptape hingegen versagten ausschließlich durch ein Herausziehen der Schrauben aus dem Nadelholz. Die Ergebnisse lassen eine deutliche Steigerung der Tragfähigkeit der Verbindung für jegliche Art der Oberflächenmodifizierung erkennen. Einzige Ausnahme bilden hierbei die Versuche mit Griptape. Wie schon bei den Reibversuchen kam es zu einem Versagen in der Klebefuge. Zu Beginn wurden wieder Versuche mit glatter Oberfläche durchgeführt, um Vergleichswerte zu ermitteln. Der Mittelwert der Höchstlast dieser Versuche lag bei $F_{\mathrm{V,test}}$ = 40,5 kN (pro Verbinder). Für die verschiedenen Pyramidenmuster konnten Höchstlasten von etwa 53 kN ermittelt werden, was eine Tragfähigkeitssteigerung

von über 30% bedeutet. In Tabelle 5.2 sind die erreichten Höchstlasten und die daraus berechneten Steifigkeiten pro Verbinder für alle untersuchten Oberflächen dargestellt.
Auffällig zu beobachten war eine Verdrehung der Verbinder und ein Endrücken der unteren Verbinderkante in das Nadelholz. Bild 5.2 rechts zeigt das Eindrücken des Verbinders ins Seitenholz am unteren Ende sowie das Klaffen der Scherfuge am oberen Ende.



Bild 5.2: Versagensarten der Versuche der Reihe 1.

5.2.2.2 Reihe 2 und 3

In weiteren Versuchen wurde daraufhin die Schraubenanordnung variiert und durch eine veränderte Schraubenanordnung versucht, die Verdrehung der Verbinder zu minimieren. Dazu wurde der Schwerpunkt der Schraubengruppe so verschoben, dass sich das resultierende Moment aus Einwirkung und Widerstand zu Null ergibt. Somit konnte die Verdrehung der Verbinder unterbunden werden, jedoch sank auch die mittlere Tragfähigkeit auf unter 50 kN. Das Versagen trat wie zuvor aufgrund des Erreichens der Zugtragfähigkeit der Schrauben ein. Bei Reihe 3 konnten Höchstlasten zwischen 80–85 kN ermittelt werden und auch hier kam es zu einem Versagen der Schrauben auf Zug.

5.2.2.3 Reihe 4

Mit der Erhöhung der Schraubenanzahl sollte ein möglicher Gruppeneffekt der Schrauben geprüft werden. Die Schrauben waren in drei Reihen à fünf Schrauben angeordnet und um 45° geneigt. Ein Einfluss der großen Anzahl an Schrauben konnte nicht festgestellt werden. Die Versuche versagten alle durch ein Herausziehen der Schrauben aus dem Holz. Die Mittelwerte der Höchstlasten lagen mit 140–150 kN bei ungefähr dem Dreifachen der Versuche mit nur einer Reihe à fünf Schrauben.

5.2.2.4 Reihe 5

Anschließend wurden Versuche mit Schrauben 6x200 mm durchgeführt. Bei diesen Versuchen trat zum ersten Mal ein Versagen der Verbinderplatten auf. Im Nettoquerschnitt in der obersten Schraubenreihe kam es zu einem Druckversagen durch Ausknicken der Furniere. Auffällig zu beobachten war vor dem Druckversagen ein starkes Durchbiegen der Verbinderteile, wodurch das Versagen der Verbinderteile unter Längsdruck begünstigt wurde, siehe Bild 5.3.



Bild 5.3: Versagen des KPH auf Längsdruck und starke Durchbiegung der Verbinderplatten der Reihe 5.

Tabelle 5.2: Höchstlasten aus den Vorversuchen und dazugehörige Steifigkeiten (Mittelwerte).

Reihe	Oberfläche	$F_{V,test}$ in kN	k_s in kN/mm
1	Glatt	40,5±0,8	16,7±0,9
	Geschliffen	50,3±1,6	16,3±3,0
	Sandgestrahlt	50,6±1,7	17,9±2,5
	Beschichtet mit EpoxyTape (0,1 mm)	57,8±1,2	13,6±0,7
	Beschichtet mit EpoxyTape (1,0 mm)	52,3±2,4	11,4±0,7
	Beschichtet mit Griptape	39,0±2,1	11,4±0,9
	Gefräst Pyramiden 1,0 mm	52,9±4,0	15,6±0,8
	Gefräst Pyramiden 1,5 mm	53,4±1,3	12,2±0,7
	Gefräst Pyramiden 2,0 mm	52,8±2,1	11,0±1,0
	Gefräst kreisförmig	49,9±0,2	14,7±1,4
2	Gefräst Pyramiden (1,0 mm) variiert	49,1±3,8	14,1±2,5
	Gefräst Pyramiden (1,5 mm) variiert	47,8±5,4	15,0±3,2
3	Gefräst Pyramiden (0,5 mm)	84,5±5,3	17,8±1,2
	Gefräst kreisförmig	80,0±2,0	17,7±1,8
4	Gefräst Pyramiden (0,5 mm)	153±4	34,0±3,5
	Geprägt	140±3	42,6±9,0
5	Geprägt	185±11	37,4±3,8

5.3 Versuche mit Prototypverbindern

5.3.1 Übersicht

In Zusammenarbeit mit der Firma Pitzl Metallbau GmbH in Altheim wurde ein erster Prototyp für einen Verbinder aus KPH entwickelt. Hauptaugenmerk lag dabei natürlich auf der behandelten Oberfläche für höhere Tragfähigkeiten. Des Weiteren wurde der Einführstutzen sehr kurz ausgeführt für eine einfache Montage und um eine eventuelle Verdrehung des Nebenträgers zuzulassen. Außerdem sollten mit dem Verbinder mögliche Fertigungstoleranzen der Holzbauteile ausgeglichen werden, weswegen eine Relativverschiebung der Verbinderplatten zueinander zugelassen wurde. Daraus ergab sich ein erster Prototyp v1, welcher in Bild 5.4 oben zu sehen ist. Für die Oberflächenbehandlung wurde das Pyramidenmuster mit 0,5 mm tiefen Pyramiden gewählt und für die Abhebesicherung Zylinderschrauben M5. Anhand der Versuchsergebnisse und Versagensarten des ersten Verbinders wurde ein zweiter Prototyp v2 mit entsprechenden Änderungen hergestellt, siehe Bild 5.4 unten. Für die Oberfläche wurde diesmal das Pyramidenmuster mit 1,0 mm tiefen Pyramiden gewählt und für die Abhebesicherung Zylinderschrauben M6. Außerdem wurden zusätzliche zu den geneigten Schrauben senkrechte Schrauben für die Montage angeordnet. Die Verbinderplatten wurden aus 25 mm dickem, kreuzweise geschichteten KPH gefräst. Als Vollgewindeschrauben wurden bei beiden Prototypen und allen Versuchen Würth ASSYplus VG 4 6x200 mm verwendet.

Im letzten Teil des Forschungsvorhabens wurde auch ein erster Prototyp für einen Schwerlastverbinder für Traglasten bis zu 500 kN hergestellt und geprüft. Die Verbinderplatten wurden aus 50 mm dickem, kreuzweise geschichtetem KPH gefräst. In die Oberfläche wurde das Pyramidenmuster mit 1,0 mm tiefen Pyramiden gefräst. Die Kraftübertragung erfolgte mit um 45° geneigten Vollgewindeschrauben. Gewählt wurden hierfür ebenfalls Würth ASSYplus VG 4 mit d = 8 mm und l = 300 mm. Insgesamt

waren pro Verbinderplatte 20 Schrauben in fünf Reihen angeordnet. Als Abhebesicherung wurden analog wie zuvor zwei Zylinderschrauben M10 gewählt. Wie in Bild 5.5 zu sehen, war die Auflagerfläche der beiden Verbinderplatten gekrümmt und der Einführstutzen lief konisch zu.

Detailzeichnungen zu allen Verbinderprototypen sind im Anhang in Bild A.19–A.21 zu finden.

Mit den Prototypen wurden ebenfalls Druck-Scher-Versuche, analog zu den Vorversuchen, in Einschubrichtung durchgeführt. Zusätzlich wurden jedoch auch Versuche in den anderen Kraftrichtungen durchgeführt. Eine Übersicht über das Versuchsprogramm ist in Tabelle 5.3 gegeben.

Tabelle 5.3: Übersicht über die durchgeführten Versuche mit den Prototypverbindern.

Kraftrichtung		Versuche	Schraubentyp/-anzahl	
Prototyp v1 (Pyramiden 0,5 mm)				
F_1	Kraft senkrecht zur Verbinderebene	10	6x200	10
F_2	Kraft in Einschubrichtung	9	6x200	10
F_{45}	Kraft senkrecht zur Einschubrichtung	10	6x200	10
M_2	Momentenbelastung	2	6x200	10
Prototyp v2 (Pyramiden 1,0 mm)				
F_1	Kraft senkrecht zur Verbinderebene	6	6x200	12
F_2	Kraft in Einschubrichtung	7	6x200	12
F_{45}	Kraft senkrecht zur Einschubrichtung	9	6x200	12
M_2	Momentenbelastung	3	6x200	12
Prototyp 500kN (Pyramiden 1,0 mm)				
F_2	Kraft in Einschubrichtung	5	8x300	20
F_{45}	Kraft senkrecht zur Einschubrichtung	6	8x300	20

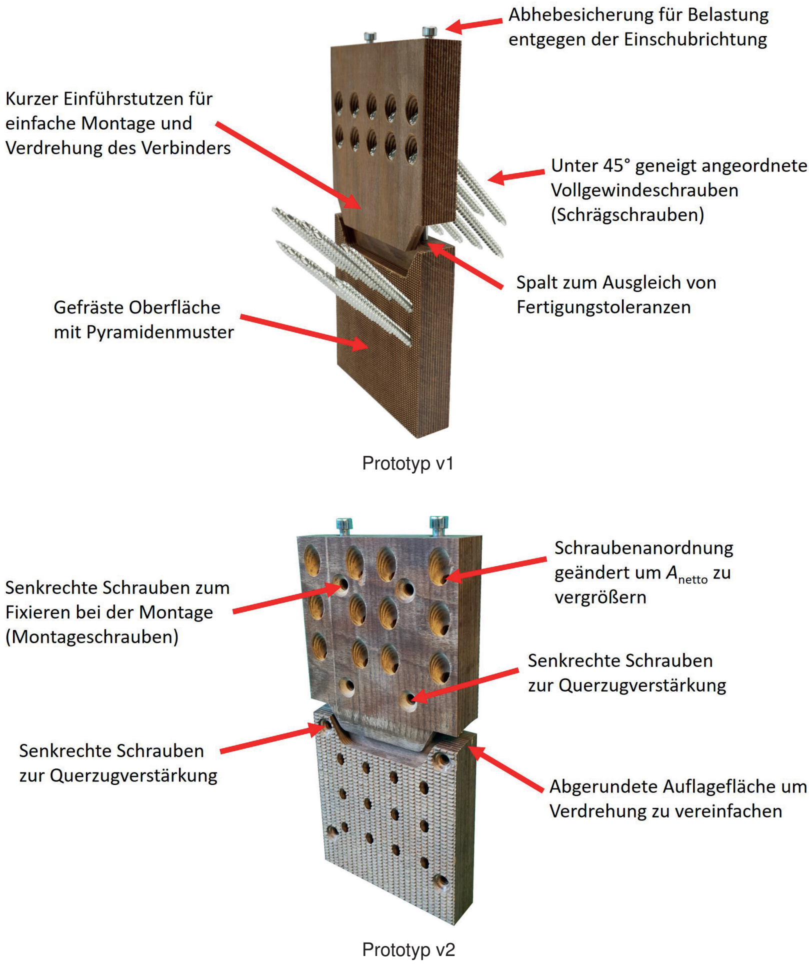


Bild 5.4: Prototypverbinder bis 180 kN: v1 und v2.

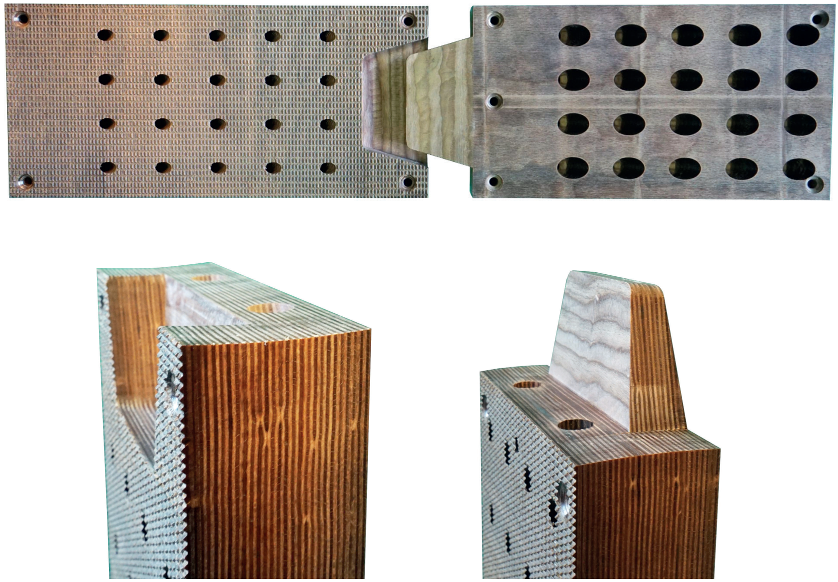
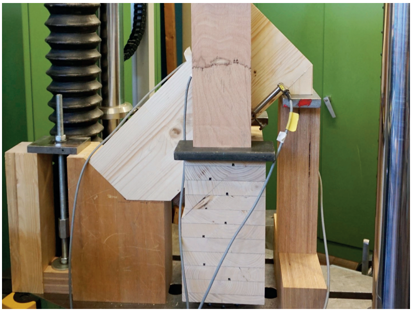


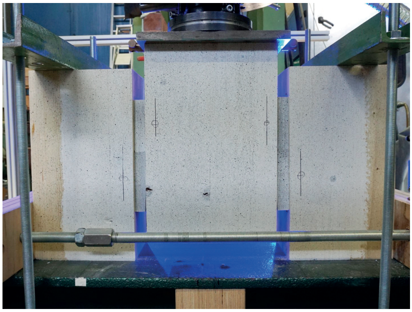
Bild 5.5: Schwerlast-Prototypverbinder 500kN.

5.3.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuchsaufbauten für die vier unterschiedlichen Belastungen sind in Bild 5.6 zu sehen. Detaillierte Zeichnungen können dem Anhang entnommen werden. Für die Seiten- und Mittelhölzer wurde BSH GL 24h verwendet, welches bei Normklima 20/65 gelagert wurde. Die Holzfeuchte und Rohdichte der Prüfkörper kann ebenfalls dem Anhang entnommen werden. Der Versuchsablauf erfolgte analog zu DIN EN 26891 mit Entlastungsschleife.



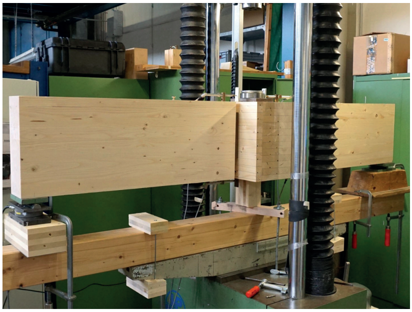
Kraft F_1



Kraft F_2



Kraft F_{45}



Moment M_2

Bild 5.6: Versuchsaufbauten für versch. Belastungsrichtungen der Prototypverbinder.

5.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Tragfähigkeit *F* ergab sich aus der maximalen Maschinenlast, welche während der Versuche aufgezeichnet wurde und wird im folgenden als Last pro Verbinder angegeben. Die Steifigkeit k_s berechnete sich im Bereich zwischen 10% und 40% der maximalen Last *F* nach Gleichung 5.1. Die Verdrehung des Nebenträgers berechnete sich nach Gleichung 5.2.

$$k_s = \frac{0,4F_{max} - 0,1F_{max}}{v_{04} - v_{01}} \tag{5.1}$$

mit v_{04} Verschiebung bei 0,4 F_{max}
v_{01} Verschiebung bei 0,1 F_{max}

$$\varphi = \tan^{-1}\left[\frac{|u_o| + |u_u|}{h}\right] \tag{5.2}$$

mit u_o Verschiebung des Nebenträgers an der Oberkante
u_u Verschiebung des Nebenträgers an der Unterkante
h Abstand zwischen den Wegaufnehmern an Ober- und Unterkante des NT

5.3.3.1 Reihe 6 - Prototypverbinder bis 180 kN

Kraft F_1 senkrecht zur Verbinderebene (Zug im Nebenträger)

Für die Versuche mit Kraft F_1 in Richtung der Nebenträgerachse wurde der Versuchsaufbau um 45° gedreht, sodass die Holzschrauben maximal auf Zug beansprucht wurden. Dabei ergab sich eine mittlere Zugkraft im Nebenträger von F_1 = 11,4 kN pro Verbinder mit Abhebesicherung. In Bild 5.7 links sind typische Versagensbilder zu sehen. Die Verbinderplatte versagte im Bereich der metrischen Schrauben auf Querzug. Beim zweiten Prototyp wurden die querzugbeanspruchten Bereiche durch die Montageschrauben verstärkt. Somit stieg die mittlere Zugkraft etwa auf das Doppelte mit F_1 = 19,4 kN pro Verbinder mit Abhebesicherung. Die Versagensbilder blieben gleich, wie in Bild 5.7 rechts zu sehen. Zusätzlich wurden mit dem zweiten Verbinderprototyp auch Versuche durchgeführt, bei denen der Nebenträger senkrecht auf dem Hauptträger stand. Die mittlere Zugkraft im Nebenträger lag mit F_1 = 16,0 kN pro Verbinder geringfügig niedriger als im gedrehten Versuchsaufbau. Das Versagen war analog zu den Versuchen zuvor.

Tabelle 5.4: Ergebnisse für Kraft F_1 senkrecht zur Verbinderebene (Mittelwerte in kN in NT-Achsrichtung).

	Prototyp v1		Prototyp v2	
	NT ∡ HT[1)] mit M5[3)]	NT ∡ HT[1)] ohne M5[4)]	NT ∡ HT[1)] mit M6[3)]	NT ⊥ HT[2)] mit M6[3)]
MEAN	11,4	6,38	19,4	16,0
SD	0,40	0,59	0,54	0,61
COV	3%	9%	3%	4%

[1)] Versuchsaufbau um 45° gedreht (Bild 5.6)
[2)] Versuchsaufbau mit NT senkrecht auf HT
[3)] Versuche mit Abhebesicherung M5 bzw. M6
[4)] Versuche ohne Abhebesicherung M5

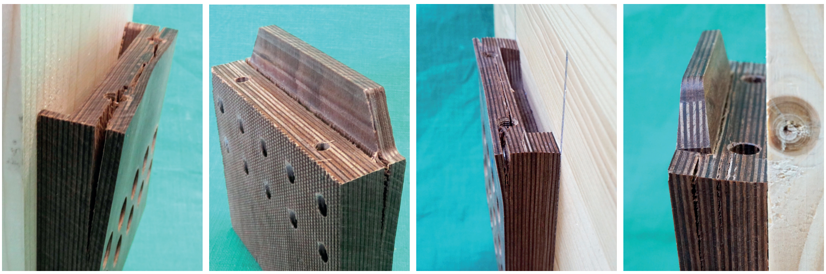


Bild 5.7: Versagensarten der Prototypen bei Belastung senkrecht zur Verbinderplatte.

Kraft F_2 in Einschubrichtung

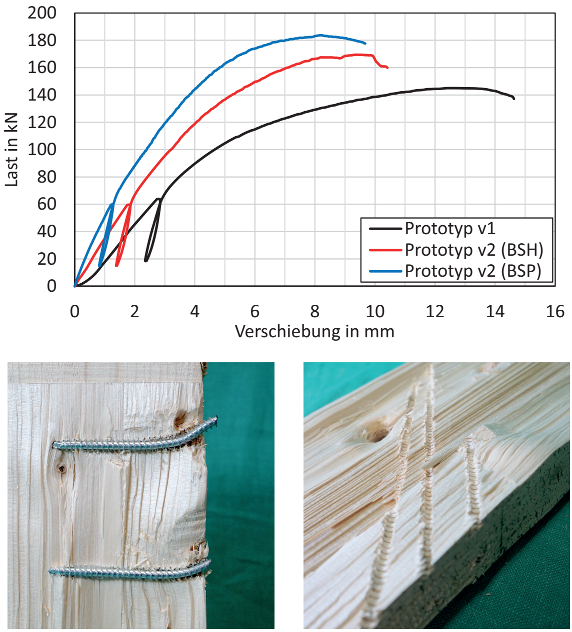
Die Druck-Scher-Versuche mit dem Prototyp v1 erreichten im Mittel eine Tragfähigkeit von F_2 = 151 kN und eine Steifigkeit von k_s = 24,8 kN/mm. Bei den Versuchen versagten sechs von acht Versuchskörpern nach Erreichen der Zugtragfähigkeit der Schrauben und zwei Versuchskörper nach Erreichen der Drucktragfähigkeit des KPH. Bei den darauffolgenden Versuchen mit dem zweiten Prototyp v2 konnte eine mittlere Tragfähigkeit von F_2 = 176 kN und eine Steifigkeit von k_s = 33,3 kN/mm ermittelt

werden. Aufgrund großer Eindrückungen der Prototypverbinder v2 in die Seitenhölzer aus BSH wurden zwei weitere Versuche mit BSP durchgeführt. Hierbei lag die mittlere Höchstlast bei F_2 = 186 kN und vor allem die Steifigkeit der Verbindung konnte durch die Querlagen deutlich erhöht werden mit k_s = 63,5 kN/mm. In Bild 5.8 sind die gemittelten Kraft-Verschiebungsdiagramme zu sehen. Deutlich zu erkennen ist die Steigerung der Tragfähigkeit und Steifigkeit des zweiten Prototyps gegenüber dem ersten, sowie die Steigerung der Tragfähigkeit und Steifigkeit bei Verwendung von BSP statt BSH. Die Auswertung der Tragfähigkeit erfolgte unabhängig von der Verformung bei der maximalen Last, die Auswertung der Steifigkeit erfolgte im Bereich zwischen 10% und 40% der maximalen Last.

Tabelle 5.5: Ergebnisse für Kraft F_2 und Steifigkeit k_s in Einschubrichtung (Mittelwerte in kN bzw. kN/mm).

	Prototyp v1		Prototyp v2			
Seiten-/Mittelholz	BSH		BSH		BSP	
	F_2	k_s	F_2	k_s	F_2	k_s
MEAN	151	25,0	173	33,3	186	44,3
SD	5	4,0	8	2,4	9	7,5
COV	3%	16%	5%	7%	5%	17%

Die Versagensart war bei allen Versuchen ein Erreichen der Zugtragfähigkeit der Schrauben, bis auf den letzten Versuch mit BSP, bei dem es zu einem Rollschub-/Querzugversagen in den Querlagen kam. Nach den Versuchen waren sehr große Verschiebungen der Verbinder ersichtlich, welche zu Fließgelenken in den geneigten Vollgewindeschrauben sowie auch in den Montageschrauben führten, siehe Bild 5.8 links. Ebenfalls ersichtlich wurde beim Auftrennen ein Verlaufen der Schrauben, siehe Bild 5.8 rechts. Es konnten jedoch keine beschädigten Schrauben entdeckt werden.



Montageschrauben Lageimperfektionen

Bild 5.8: Last-Verschiebungsdiagramm für Belastung in Einschubrichtung (gemittelte Kurven) und Versagensbilder der Schrauben.

Kraft F_{45} senkrecht zur Einschubrichtung

Die Lasteinleitung erfolgte mittig auf Höhe der Fuge zwischen den beiden Verbinderplatten. Die Versuchskörper des Prototyp v1 erreichten im Mittel eine Höchstlast von $F_{45,\text{mittig}}$ = 20,8 kN. Die Verbinder versagten durch eine Kombination aus Abscheren der Wandung auf welchem der Einführstutzen seitlich auflag, sowie einem Scherversagen der Furniere direkt unterhalb der metrischen Schrauben. In Bild 5.9 sind Versagensbilder für die beiden Prototypen zu sehen. Da bei dem zweiten Prototyp v2 die senkrechten Montageschrauben zusätzlich als Verstärkung angeordnet waren, konnte eine deutliche Steigerung der Tragfähigkeit erreicht

werden mit $F_{45,\text{mittig}}$ = 27,9 kN. Ebenfalls wurden mit beiden Prototypen Versuche mit ausmittiger Lasteinleitung durchgeführt. Die Ausmitte betrug dabei jew. e = 135 mm. Im Mittel erreichte der Prototyp v1 lediglich eine Höchstlast von $F_{45,\text{ausmittig}}$ = 8,1 kN. Aufgrund des kurzen Einführstutzen wurde die Last zum größten Teil über die metrischen Schrauben der Abhebesicherung abgetragen. Die obere der beiden Schrauben wurde aus dem KPH-Verbinder herausgezogen, die mittlere Höchstlast deckt sich mit den Ergebnissen der Herausziehversuche aus Abschnitt 3.3.1. Für die Versuche mit dem Prototyp v2 wurde eine Höchstlast von $F_{45,\text{ausmittig}}$ = 8,3 kN ermittelt, was ebenfalls der Herausziehtragfähigkeit bei einer Einbindetiefe von 20 mm entspricht.
In Bild 5.9 sind typische Versagensarten für die Versuche mit Belastung senkrecht zur Einschubrichtung zu sehen. Deutlich zu erkennen ist der Unterschied zwischen den beiden Prototypen v1 ohne Montageschraube und v2 mit Montageschraube, welche gleichzeitig als Verstärkung der seitlichen Wandung dient.

Tabelle 5.6: Ergebnisse für Kraft F_{45} senkrecht zur Einschubrichtung (Mittelwerte in kN).

	Prototyp v1		Prototyp v2	
	mittig	ausmittig	mittig	ausmittig
MEAN	20,8	8,1	27,9	8,3
SD	2,2	1,2	1,5	0,6
COV	10%	14%	6%	7%



Bild 5.9: Versagensarten der Prototypen bei Belastung senkrecht zur Einschubrichtung.

Moment M_2 (Momententragfähigkeit)

Um die Verdrehung der Verbinder zu ermitteln, wurden Versuche mit einer Biegebeanspruchung durchgeführt. Als Versuchsaufbau wurde ein Drei-Punkt-Biegeversuch gewählt, mit den Verbindern in der Mitte an der Stelle des größten Momentes. Im Mittel betrug das maximal aufnehmbare Moment pro Prototypverbinder v1 M_2 = 1,0 kNm bei einer Verdrehung von φ_2 = 3,1°. Beim zweiten Prototyp v2 verdoppelte sich die Momententragfähigkeit auf M_2 = 2,0 kNm während hingegen die Verdrehung etwa gleich blieb mit φ_2 = 2,9°. In Bild 5.10 sind sehr deutlich die großen Verformungen erkennbar, bei denen dann letztendlich ein Querzugversagen der Verbinderplatte auftrat. Im rechten Bild wird die Wirkung der senkrechten Schrauben deutlich, da hier die Querzugbeanspruchung der Verbinderplatten deutlich geringer ausfällt.

Tabelle 5.7: Ergebnisse für Moment M_2 und Drehfedersteifigkeit k_φ (Mittelwerte in kNm bzw. kNm/rad) sowie maximale Verdrehung φ_2 (in Grad).

	Prototyp v1			Prototyp v2		
	M_2	k_φ	φ_2	M_2	k_φ	φ_2
MEAN	1,0	29,4	3,1	2,0	80,9	2,9
SD	0,03	4,3	0,3	0,08	44,2	1,9
COV	3%	18%	9%	4%	55%	66%

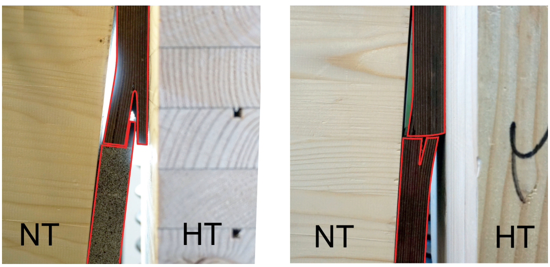


Bild 5.10: Versagensarten der Prototypen bei Momentenbeanspruchung.

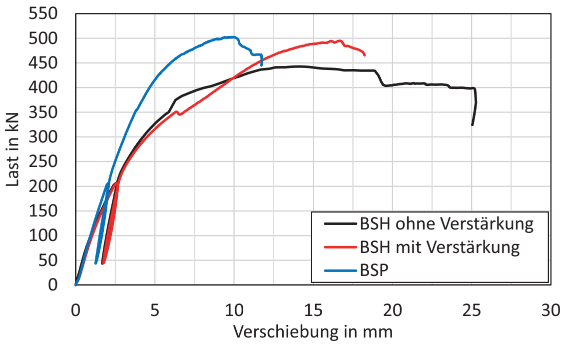
5.3.3.2 Reihe 7 - Prototypverbinder bis 500 kN

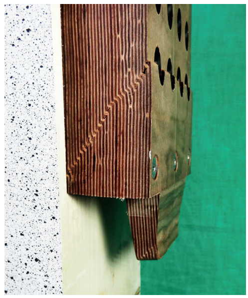
Kraft F_2 in Einschubrichtung

Beim ersten Versuch konnte die Schätzlast nicht erreicht werden, da die beiden Seitenhölzer unterhalb der Verbinderplatten auf Querdruck versagten. In den darauffolgenden Versuchen wurden die Bauteile aus Nadelholz mit Vollgewindeschrauben 8x160 mm verstärkt. Daraufhin kam es bei den Versuchen zweimal zu einem Längsdruckversagen der Verbinderplatten aus KPH, siehe Bild 5.11, sowie einmal zum Erreichen der Zugtragfähigkeit der Schrauben. Die mittlere Höchstlast betrug $F_{2,\mathrm{BSH}}$ = 496 kN pro Verbinder und die dazugehörige Steifigkeit k_s = 81 kN/mm. Um auf die Querdruckverstärkung mit den Vollgewindeschrauben unter den Verbinderplatten zu verzichten, wurde ein letzter Prüfkörper aus Brettsperrholz hergestellt. Hierfür wurde 5-lagiges BSP verwendet. Im Versuch konnte nur eine geringfügig höhere Höchstlast erreicht werden mit $F_{2,\mathrm{BSP}}$ = 503 kN. Die Steifigkeit der Verbindung konnte jedoch um fast 30% auf k_s = 105 kN/mm gesteigert werden. Bild 5.11 zeigt das Last-Verschiebungsdiagramm. Gut zu erkennen ist das plastische Verhalten der Verbindung ohne Querdruckverstärkung, welche eine sehr große Verschiebung aufweist. Ebenfalls auffallend ist die deutliche Steigerung der Steifigkeit des Versuchs mit BSP als Seiten-/Mittelholz.

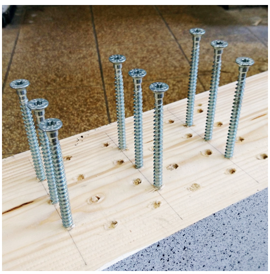
Auch bei diesen Versuchen waren große Verformungen beobachtet worden. Nach dem Auftrennen der Versuchskörper war die Verbiegung der Schrägschrauben wie in Bild 5.11 gut sichtbar. Dies erklärt möglicherweise die Abweichung der Schätzlast und der tatsächlichen Höchstlast. Beim Demontieren eines Verbinders nach dem Versuch wurden beschädigte Schrauben entdeckt. Beim Einschrauben der Schrägschrauben muss es zur Kollision mit einer senkrechten Montageschraube gekommen sein, sodass bei beiden Schrauben das Gewinde beschädigt wurde. Die zuerst eingedrehte Montageschraube wurde an einer Stelle getroffen. Die später eingedrehte Schrägschraube hatte ein beschädigtes Gewinde

von der Spitze bis zu dem Kreuzungspunkt der beiden Schrauben (Bild 5.11). Auf diese Problematik wurde schon von Frese & Jordan [12] hingewiesen und ein entsprechendes Kegelmodell für den Mindestabstand vorgeschlagen. Dieses wurde hier bei der Wahl der Mindestabstände jedoch nicht angewendet, da die etwa 60 mm lange Führung der Schrauben durch die Verbinderplatte als ausreichend angesehen wurde.

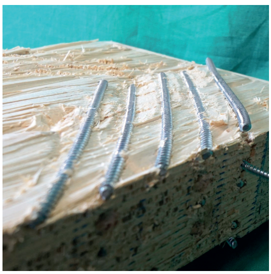




Längsdruckversagen KPH



Querdruckverstärkung



Verformung der Schrauben



Beschädigte Schrauben

Bild 5.11: Last-Verschiebungsdiagramme und Versagensarten für Schwerlastprototyp.

Kraft F_{45} senkrecht zur Einschubrichtung

Bei den Versuchen wurde im Mittel eine Höchstlast von $F_{45,\text{mittig}} = 83{,}9$ kN erreicht. Das Versagen war ein seitliches Ausbrechen der oberen Abhebesicherung aus dem KPH-Verbinder, sowie ein Versagen der seitlichen Wandung auf welcher der Einführstutzen auflag, siehe Bild 5.12 links. Im Vergleich dazu wurde bei den Versuchen mit ausmittiger Lasteinleitung lediglich eine Höchstlast von $F_{45,\text{ausmittig}} = 9{,}82$ kN erreicht, was gerade einmal einem Drittel der Herausziehtragfähigkeit aus Abschnitt 3.3.1 entspricht. Die Ausmitte betrug $e = 315$ mm.
In Bild 5.12 links ist deutlich die Verdrehung des Verbinders, bei mittiger Lasteinleitung, um den Schwerpunkt der Schrägschrauben zu sehen. Im Bild 5.12 rechts ist hingegen ein Versuchskörper nach ausmittiger Belastung zu sehen. Die Verdrehung der sichtbaren Verbinderplatte ist deutlich geringer, die Beanspruchung der Abhebesicherung und seitlichen Wandung jedoch ist deutlich höher. Somit kommt es zu einem ausgeprägterem Versagensbild, mit deutlichem Abscheren der seitlichen Wandung und des Bereichs unterhalb der metrischen Schraube.



Bild 5.12: Versagensarten der Prototypen bei Belastung senkrecht zur Einschubrichtung.

Tabelle 5.8: Übersicht über die Versuchsergebnisse aller untersuchten Kraftrichtungen des Schwerlastprototypen (Mittelwerte).

Kraftrichtung	F_2 in kN		k_s in kN/mm		F_{45} in kN	
					mittig	ausmittig
MEAN	496	503[1)]	81,0	105[1)]	83,9	9,82
SD	5	-	4,3	-	4,8	0,2
COV	1%	-	5%	-	6%	2%

1) Versuch mit BSP

5.4 Zusammenfassung

Insgesamt wurden 63 Vorversuche mit verschiedenen Schraubentypen, -anzahl und -anordnung durchgeführt. Die Versuche haben gezeigt, dass behandelte Oberflächen mit höheren Reibbeiwerten auch in Kombination mit geneigten Schrauben zu höheren Tragfähigkeiten führten. Ein Gruppeneffekt von mehreren, dicht angeordneten Schrauben konnte nicht entdeckt werden. Zusätzlich wurden insgesamt 67 Versuche mit drei verschiedenen Verbinderprototypen durchgeführt. Zu den Versuchen in Einschubrichtung, analog zu den Vorversuchen, kamen auch weitere Versuche in die verschiedenen Belastungsrichtungen der Verbinder hinzu. Im Mittel konnten Tragfähigkeiten bis zu F_2 = 180 kN für den kleinen Verbindertyp und Tragfähigkeiten bis zu F_2 = 500 kN für den Schwerlastverbinder erreicht werden. Die Versuche mit den Prototypen haben gezeigt, dass es bei Verbindungen mit geneigten Schrauben und erhöhter Reibung in der Scherfuge zu großen Verformungen in den Schrauben kommen kann, welche die axiale Tragfähigkeit der Schrauben verringern. Außerdem wurde in den Versuchen ersichtlich, dass auch Materialversagen der KPH-Verbinder (Längsdruck) bzw. Hauptträger (Querdruck) maßgebend sein kann. Die metrischen Schrauben dienen nicht allein zur

Abhebesicherung, sondern haben auch erheblichen Anteil beim Lastabtrag bei Belastung senkrecht zur Einschubrichtung. Um in diesem Fall die Tragfähigkeit zu maximieren, sollte die Einbindetiefe der Abhebesicherung auf die maximale Gewindelänge der metrischen Schrauben erhöht werden.

6 Haupt-Nebenträger-Systemversuche mit Prototypverbindern

6.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Zum Abschluss des Projektes wurden großformatige Hauptträger-Nebenträger-Versuche durchgeführt, um das Verhalten der Verbinder am Gesamtsystem zu untersuchen. Insgesamt wurden fünf Versuche mit dem Prototypverbinder v2 und drei Versuche mit dem Schwerlastprototyp durchgeführt. Der Versuchsaufbau umfasste einen Nebenträger, welcher an beiden Enden über die KPH-Verbinder an jeweils einem Hauptträger angeschlossen wurde. Aufgrund von Materialbedarf wurde sich für einen Drei-Punkt-Biegeversuch entschieden und gegen einen deutlich materialintensiveren Vier-Punkt-Biegeversuch. Der Versuchsaufbau ist in Bild 6.1 zu sehen. Für die Haupt- und Nebenträger wurde BSH GL 24h verwendet. Die Länge der Nebenträger wurde so gewählt, dass eine Lastausbreitung unter 45° ausgehend von der Lasteinleitung nicht mit den geneigten Schrauben der Verbinder interferiert.

Um ein Querzugversagen des Nebenträgers zu verhindern wurden die Verbinderplatten an der Unterkante des Nebenträgers befestigt. Am Hauptträger wurden die Verbinder so angeordnet, dass das Verhältnis $h_e/h \geq 0{,}7$ beträgt, und somit rechnerisch kein Querzugnachweis nötig ist. Zusätzlich wurden die Bauteile entsprechend verstärkt. Zu den

Verstärkungen zählten eine Querdruckverstärkung im Lasteinleitungsbereich und am Auflager, sowie eine Querzugverstärkung kurz hinter den Schraubenspitzen der Schrägschrauben der Verbinder (Bild 6.3). Außerdem wurden hier bei beiden untersuchten Verbindern die Hauptträger unter den Verbinderplatten mit Vollgewindeschrauben verstärkt, um ein vorzeitiges Querdruckversagen auszuschließen. Hierfür wurden die Vollgewindeschrauben um 2,5 mm im Hauptträger versenkt, sodass sich das gefräste Pyramidenmuster trotzdem noch in das Nadelholz eindrücken konnte.

Der Versuchsablauf erfolgte wie bei den Druck-Scher-Versuchen mit Entlastungsschleife nach DIN EN 26891. Während den Versuchen wurde mit induktiven Wegaufnehmern die vertikale Relativverschiebung von Nebenträger zu Hauptträger auf Höhe der Verbinder gemessen, sowie die horizontale Verschiebung des Nebenträgers an seiner Ober- und Unterkante. Mit der horizontalen Relativverschiebung konnte dann die Verdrehung des Nebenträgers berechnet werden. Die Hauptträger waren mit Gabellagern gegen verdrehen gesichert.

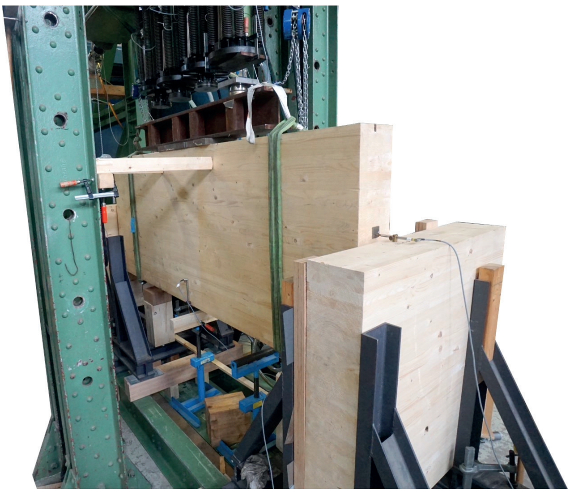


Bild 6.1: Versuchsaufbau HT-NT-Träger.

6.2 Ergebnisse und Diskussion

6.2.1 Verbinderprototyp v2

Nach den Versuchen wurde die Höchstlast pro Verbinder, unabhängig von der Verformung, sowie die Steifigkeit zwischen 10% und 40% der Höchstlast ausgewertet. Eine Übersicht ist in Tabelle 6.1 gegeben. Im Mittel erreichten die Versuche eine Höchstlast von F_2 = 172 kN, was ungefähr den Versuchsergebnissen der Druck-Scher-Versuche entsprach, siehe die Last-Verschiebungsdiagramme in Bild 6.2. Auch die mittlere Steifigkeit lag mit k_s = 31,1 kN/mm nah an den Ergebnissen der vorangegangenen Druck-Scher-Versuchen. Beim ersten Versuch kam es zu einem Fehler bei der Messdatenermittlung, weshalb der Versuch bei einer Last von ca. 90 kN abgebrochen wurde. Der selbe Versuchskörper wurde im zweiten Versuch nochmal geprüft, was die etwas höheren Steifigkeiten erklärte. Die Verdrehung des Nebenträgers an seinen Enden lag im Mittel lediglich bei φ_2 = 0,38 Grad. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund des kurzen Einführstutzen die obere Verbinderplatte sich frei bewegen konnte und somit nicht die starke Verdrehung der unteren Verbinderplatte mitmachte, wie bei handelsüblichen Schwalbenschwanz-Verbindern zu beobachten ist.

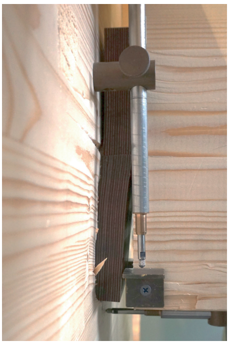
Die starke Verdrehung der unteren Verbinderplatten trat auf, da sich der Verbinder am Hauptträger trotz der Querdruckverstärkung sehr stark ins Holz eindrückte und es so zum Versagen kam (Bild 6.2). Nur beim letzten Versuch kam es zu einem Schraubenversagen, welche aus dem Hirnholz des Nebenträgers herausgezogen wurden. Es konnten also ähnliche Tragfähigkeiten und Steifigkeiten wie in den Druck-Scher-Versuchen ermittelt werden, die Versagensarten unterschieden sich jedoch deutlich. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass aufgrund der Verdrehung des Nebenträgers die Kraft nicht mehr mittig im Verbinder weitergeleitet wird. Es entstand eine geringe Exzentrizität, die dazu führte, dass der Verbinder sich verdrehte und in das Seitenholz des

Hauptträgers hineingedrückt wurde. So ähnlich war das auch schon bei der Reihe 1 der Vorversuche mit fünf Schrauben zu beobachten.

Tabelle 6.1: Höchstlasten aus den Versuchen am Gesamtsystem für den Verbinderprototyp v2.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
v2-HTNT-0 [1)]	89	3,30	3,44	29,4	26,3
v2-HTNT-1 [2)]	181	10,0	10,8	37,2	35,0
v2-HTNT-2	165	10,2	13,2	30,4	27,1
v2-HTNT-3	171	11,0	14,8	33,5	34,6
v2-HTNT-4	169	10,7	11,6	33,3	33,9

[1)] Fehler bei der Messdatenerfassung
[2)] Vorbelastet bis 89 kN



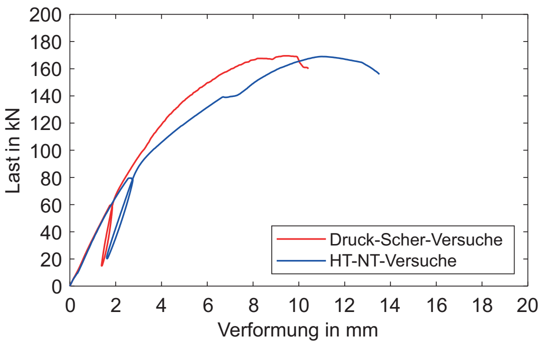


Bild 6.2: Verdrehen des Verbinders am Hauptträger (links) und Vergleich der Last-Verformungskurven (rechts).

6.2.2 Schwerlast-Verbinderprototyp

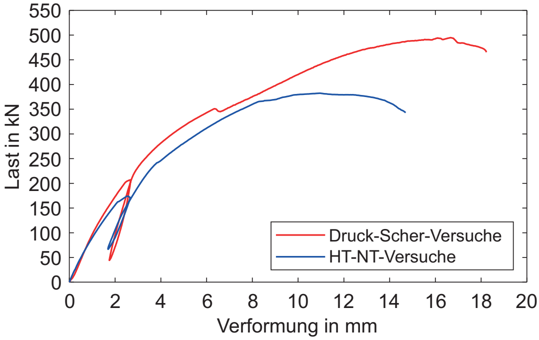
Bei den Versuchen mit dem Schwerlast-Verbinder konnte nicht das volle Potential der Verbinder ausgeschöpft und die Ergebnisse der Druck-Scher-Versuche reproduziert werden. Im Mittel kamen die Versuche auf eine Höchstlast von F_2 = 394 kN und eine Steifigkeit von k_s = 71,6 kN/mm. In Bild 6.3 ist das gemittelte Last-Verschiebungsdiagramm der Systemversuche und dazu im Vergleich das gemittelte Last-Verschiebungsdiagramm der Druck-Scher-Versuche zu sehen.

Im Gegensatz zu den Druck-Scher-Versuchen kam es bei den Versuchen zu Querzugversagen am Hirnholzende im Nebenträger und zwar im Bereich der geneigten Schrauben (Bild 6.3 unten links). Beim dritten und letzten Versuch wurden zusätzliche Vollgewindeschrauben als Querzugverstärkung zwischen die Schrägschrauben der Verbinder eingedreht (Bild 6.3 unten rechts). Dadurch konnte die Tragfähigkeit zwar nochmal etwas gesteigert werden, aber auch hier blieb der Prototyp hinter seinen Erwartungen.

Tabelle 6.2: Höchstlasten aus den Versuchen am Gesamtsystem für den Schwerlast-Verbinderprototyp.

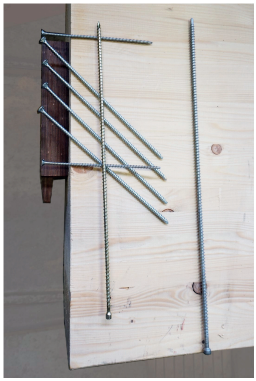
Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
500kN-HTNT-1	393	11,8	14,3	74,0	68,1
500kN-HTNT-2	362	10,5	9,30	73,4	72,2
500kN-HTNT-3 [1)]	429	12,2	11,7	68,6	73,6

[1)] Zusätzliche Querzugverstärkung im Nebenträger





Querzugversagen



Querzugverstärkung

Bild 6.3: Vergleich der Last-Verformungskurven und Versagen am Hirnholzende im Nebenträger.

6.3 Zusammenfassung

Es wurden insgesamt acht Versuche mit HT-NT-Verbindern aus KPH und großformatigen BSH-Trägern durchgeführt, um etwaige Systemeffekte zu berücksichtigen. Die Versuchsergebnisse müssen für die beiden Verbinderprototypen getrennt betrachtet werden. Die Versuche mit dem kleinen Prototyp v2 haben gezeigt, dass sich der Nebenträger zwar verdreht, aber aufgrund des kurzen Einführstutzen sich die Verbinderplatten getrennt voneinander verdrehen können. Dadurch kommt es zu einer exzentrischen Belastung der unteren Verbinderplatte, was wiederum die Verdrehung dieser Verbinderplatte verstärkt und somit die Querdruckbeanspruchung des Hauptträgers begünstigt.

Die Versuche mit den Schwerlast-Verbindern haben gezeigt, dass die große Anzahl sehr nah beieinander angeordneter Schrauben neben lokalem Querdruckversagen auch zu lokalem Querzugversagen führt. Dies ist zwar mit entsprechenden Verstärkungsmaßnahmen hinauszuzögern, aber letztendlich nicht zu unterbinden. Auch die zusätzliche Kraftkomponente aufgrund Reibung ist hierbei nicht außer Acht zu lassen.

7 Analytisches Rechenmodell

7.1 Rechenmodell für Verbindungen mit geneigten Schrauben

Die Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln wird üblicherweise nach der Theorie von Johansen [8] berechnet. Dabei wird jedoch nur der Anteil rechtwinklig zur Achse des Verbindungsmittels betrachtet. In Bild 7.1 ist eine Verbindung mit schräg eingedrehten Schrauben zu sehen. Die Schrauben sind um den Winkel α gegenüber der Verbinderebene bzw. Scherfuge geneigt. Aus Gleichgewichtsgründen entsteht aufgrund der horizontalen Komponente der Schraubenkraft eine Druckkraft rechtwinklig zur Scherfuge. Diese Druckkraft wiederum aktiviert Reibung in der Scherfuge, was als Seileffekt bezeichnet wird.

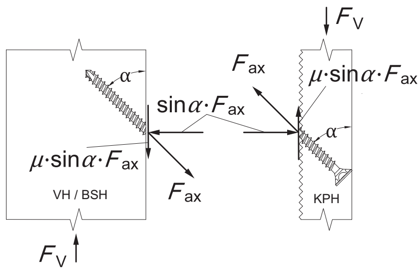


Bild 7.1: Schnittgrößen in der Scherfuge unter Berücksichtigung der Reibung zwischen der modifizierten Oberfläche und dem Holzbauteil.

Bejtka & Blaß [1] zeigten, dass auch schon bei geringer Schrägstellung der Schrauben zusätzliche Kräfte über Reibung zwischen den Bauteilen übertragen werden können. Dies wird in der Bemessung von abscherbeanspruchten Verbindungsmitteln (α = 90°) mit dem Faktor $\Delta F_{V,Rk}$ berücksichtigt. Mit kleiner werdendem Winkel α steigt der Anteil der Axialbeanspruchung an der Gesamttragfähigkeit an, während hingegen der Anteil der Abscherbeanspruchung sinkt. Aufgrund unterschiedlicher Steifigkeiten bei Axial- und Abscherbeanspruchung – der Unterschied beträgt etwa eine Größenordnung – wird bei einem Winkel α = 45° praktisch die gesamte Last durch Axialbeanspruchung der Schraube übertragen und der Anteil aus Abscherbeanspruchung kann vernachlässigt werden [13].

Die Gesamttragfähigkeit F_V der Verbindung berechnet sich somit analog zu Bild 7.1 als die Summe des vertikalen Anteils der Schraubenkraft und der vertikalen Reibkraft in der Scherfuge (siehe Gleichung 7.1). Die wirksame Verbindungsmittelanzahl wird dabei entgegen dem Eurocode 5 mit $n_{ef} = n$ angesetzt.

$$F_{\mathrm{V}} = n \cdot F_{\mathrm{ax}} \cdot (\cos\alpha + \mu \cdot \sin\alpha) \tag{7.1}$$

Für die axiale Tragfähigkeit der Schrauben auf Herausziehen werden zwei verschiedene Formeln betrachtet. Gleichung 7.2 von Blaß et al. [14] ermittelt den Ausziehwiderstand in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel. Die Gleichung beruht auf über 700 Versuchen und kann auch auf selbstbohrende Holzschrauben anderer Hersteller übertragen werden, sofern die geometrischen Eigenschaften mit denjenigen der untersuchten Schrauben ähnlich sind.

$$F_{\mathrm{ax}} = \frac{0,6 \cdot \sqrt{d} \cdot l_{\mathrm{ef}}^{0,9} \cdot \rho^{0,8}}{1,2 \cdot \cos^2\alpha + \sin^2\alpha} \tag{7.2}$$

Gleichung 7.3 von Frese et al. [15] berechnet ebenfalls den Ausziehwiderstand von selbstbohrenden Holzschrauben und wurde mittels Regressionsrechnungen auf Grundlage von 1850 Ausziehversuchen ermittelt. Sofern auch hier die geometrischen Eigenschaften der Schrauben vergleichbar sind, schätzt Gleichung 7.3 den Ausziehwiderstand genauer als bisher rechnerisch ab, gilt jedoch nur für Einschraubtiefen bis 140 mm.

$$\ln F_{\mathrm{ax}} = 6,739 + 0,03257 \cdot l_{\mathrm{ef}} + 2,148 \cdot 10^{-4} \cdot d \cdot \rho - 1,171 \cdot 10^{-4} \cdot l_{\mathrm{ef}}^2 \quad (7.3)$$

Die Rohdichte wurde nach den Versuchen an jedem Seiten- und Mittelholz bestimmt. Für die Reibungskoeffizienten wurden die Mittelwerte der jeweiligen Oberfläche aus den vorangegangen Reibversuchen übernommen. In Tabelle 7.1 sind die berechneten Tragfähigkeiten auf Herausziehen der Schrauben angegeben, welche rechnerisch maßgebend waren. Außerdem wurde zum Vergleich das Verhältnis der maßgebenden berechneten Werte, $F_{\mathrm{V,exp}}$, zu den Höchstlasten aus den Versuchen, $F_{\mathrm{V,test}}$, berechnet. Der Vergleich lieferte einen kleinsten Verhältniswert von 0,86 und einen mittleren Verhältniswert von 1,01 bei der Verwendung von Gleichung 7.2 bzw. einen kleinsten Verhältniswert von 0,82 und einen mittleren Verhältniswert von 0,98 bei der Verwendung von Gleichung 7.3. Die mittleren Verhältniswerte bestätigten bereits eine sehr gute Übereinstimmung des Rechenmodells mit den Höchstwerten aus den Versuchen mit kurzen Schraubenlängen und lediglich fünf Schrauben, auch für signifikant höhere Reibbeiwerte. Die Verhältniswerte für alle Versuche sind in Tabelle A.59 im Anhang A.5 aufgeführt.

Auch für die Versuche der Reihe 4 mit 15 Schrauben und ℓ = 100 mm war der Verhältniswert im Mittel größer als 1,0 (siehe Tabelle 7.2). Doch bei den Versuchen der Reihen 3 und 5, mit längeren Schrauben, die so dimensioniert waren, dass das Erreichen der Zugtragfähigkeit der Schrauben maßgebend wurde, überschätzte das Modell die Tragfähigkeit regelmäßig, wie in Bild 7.3 an den blauen Punkten zu sehen ist.

Tabelle 7.1: Rechnerische Tragfähigkeiten $F_{V,exp}$ (in kN) und Vergleich $F_{V,test}$ / $F_{V,exp}$ der berechneten Werte mit den Höchstlasten aus den Versuchen der Reihen 1 und 2.

Reihe	Oberfläche	mit F_{ax} nach Gl. 7.2	Vgl.	mit F_{ax} nach Gl. 7.3	Vgl.
1	Glatt	36,4	1,11	37,6	1,08
	Geschliffen	47,3	1,07	48,7	1,03
	Sandgestrahlt	45,7	1,11	47,0	1,07
	Beschichtet mit EpoxyTape (0,1 mm)	54,4	1,06	56,3	1,03
	Beschichtet mit EpoxyTape (1,0 mm)	53,3	0,98	54,7	0,96
	Beschichtet mit Griptape	38,4	1,01	39,4	0,99
	Gefräst Pyramiden 1,0 mm	53,8	0,98	56,7	0,93
	Gefräst Pyramiden 1,5 mm	58,6	0,91	61,6	0,87
	Gefräst Pyramiden 2,0 mm	61,2	0,86	64,7	0,82
	Gefräst Kreisförmig	49,7	1,00	48,9	1,02
2	Gefräst Pyramiden 1,0 mm (variiert)	55,3	0,88	57,6	0,85
	Gefräst Pyramiden 1,5 mm (variiert)	57,9	0,80	62,6	0,77

Tabelle 7.2: Rechnerische Tragfähigkeiten $F_{V,exp}$ (in kN) und Vergleich $F_{V,test}$ / $F_{V,exp}$ der berechneten Werte mit den Höchstlasten aus den Versuchen der Reihen 3 bis 5.

Reihe	Oberfläche	Schraubentyp/-anzahl		$F_{V,exp}$	$F_{V,test}$ / $F_{V,exp}$
3	Gefräst kreisförmig	6x180	5	89,4	0,89
	Gefräst Pyramidenmuster (0,5 mm)	6x180	5	91,4	0,92
4	Gefräst Pyramidenmuster (0,5 mm)	6x100	15	146	1,05
	Geprägt	6x100	15	132	1,06
5	Geprägt	6x200	15	191	0,97

Die rechnerische Tragfähigkeit in Tabelle 7.2 wurde nur noch mit der Herausziehtragfähigkeit der Schrauben nach Gleichung 7.2 berechnet, da die Einbindetiefe der Schrauben für Reihe 3 und 5 größer 140 mm betrug.

Die Druck-Scher-Versuche haben jedoch gezeigt, dass die maximale Kraft bei größeren Verschiebungen eintrat, als sie es bei der Auswertung der Reibbeiwerte waren. Daher wurde die Auswertung des statischen Reibbeiwertes näher betrachtet. In Bild 7.2 links ist die Last-Verformungskurve beispielhaft für einen Versuch zu sehen. Die Höchstlast wird hier bei einer mittleren Relativverschiebung von ca. 3 mm erreicht. Die Ermittlung des Reibbeiwertes erfolgte in Kapitel 4 jeweils an der maximalen Stelle. In Bild 7.2 rechts ist beispielhaft das Diagramm für einen Reibversuch dargestellt. Der Haftungskoeffizient wurde bei einer Verschiebung zwischen 1–2 mm ermittelt. Der Gleitreibungskoeffizient hingegen trat erst bei Verschiebungen größer 10 mm auf.

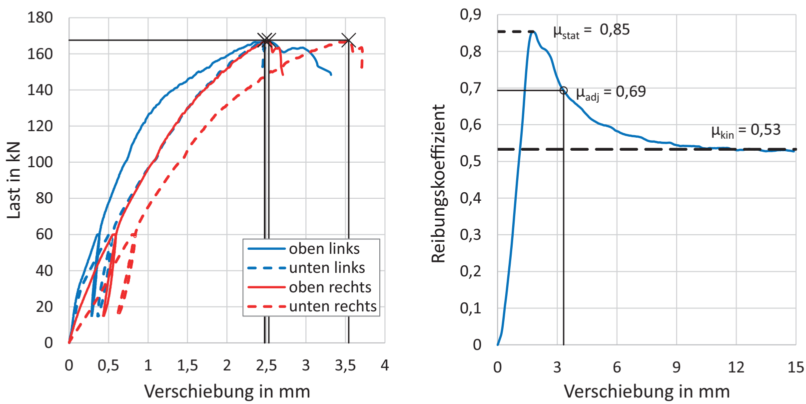


Bild 7.2: Relativverschiebung der Scherfläche (links) und Auswertung des angepassten Reibungskoeffizienten μ_{adj} (rechts).

Daher wurden die Reibungsversuche neu ausgewertet und der Reibbeiwert bei derselben Verschiebung ermittelt, wie sie auch in den Druck-Scher-Versuchen auftrat. Dieser angepasste Reibbeiwert wurde mit μ_{adj} bezeichnet und liegt von der Größenordnung zwischen dem statischen Reibbeiwert und dem Gleitreibungskoeffizienten (siehe Bild 7.2 rechts). Die neu bestimmten rechnerischen Tragfähigkeiten kommen schon deutlich näher an die Versuchsergebnisse heran, überschätzen jedoch weiterhin die Tragfähigkeit, vor allem von den Versuchen mit den Prototypverbindern, siehe dazu in Bild 7.3 die roten Dreiecke.

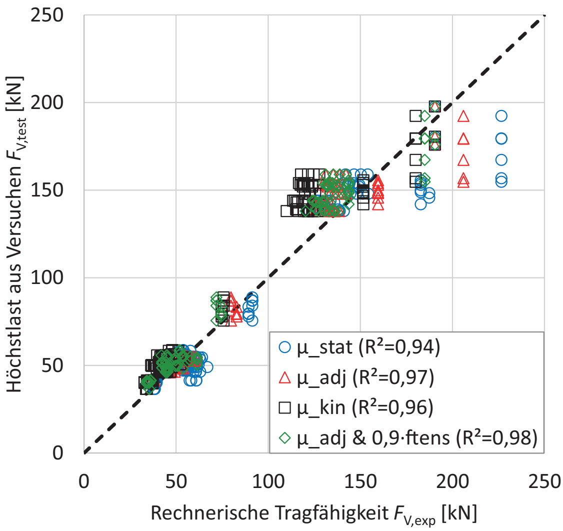


Bild 7.3: Vergleich des Modells mit den Versuchsergebnissen der Reihen 1 bis 5.

7.2 Rechenmodell mit Berücksichtigung von MNV-Interaktion

In Abschnitt 7.1 wurde das Modell zu Berechnung der Tragfähigkeit einer Verbindung mit geneigten Schrauben vorgestellt. Eingangswerte bei dem Modell sind das Minimum aus Herausziehtragfähigkeit und Zugtragfähigkeit sowie der maximale statische Reibbeiwert, bzw. nach erster Überarbeitung der angepasste Reibbeiwert. Bei genauerer Betrachtung dieser Versuche zeigte sich, dass sehr große Verformungen auftraten und es zu Fließgelenken in den Vollgewindeschrauben kam (siehe Bild 5.11). Dies ließ vermuten, dass es in den Schrauben zu einer Momenten-Normalkraft-Interaktion kam und aufgrund der Fließgelenke nicht der komplette Schraubenquerschnitt zur Übertragung von Normalkräften zur Verfügung stand. Dies erklärt, wieso die rechnerische Tragfähigkeit größer als die tatsächliche Tragfähigkeit ist.

Um zu überprüfen ob es zu einer Momenten-Normalkraft-Interaktion kommt, eignet sich folgende Näherung, die von Blaß [16] vorgestellt wurde:

$$\frac{M}{M_{\mathrm{y}}} + \left(\frac{N}{f_{\mathrm{tens}}} + \frac{V}{f_{\mathrm{shear}}}\right)^2 = 1 \tag{7.4}$$

Mit der Normalkraft N in der Schraube kann man über die Flächenaufteilung des Kreisquerschnittes der Schraube das zeitgleich wirkende Moment M berechnen. Setzt man diese Werte zusammen mit dem Fließmoment M_{y} sowie der Zugtragfähigkeit f_{tens} in Gleichung 7.4 ein, erhält man für die entsprechenden Versuche mit den Prototypen Verhältniswerte größer 1,0. Die Querkraft darf vernachlässigt werden. Zum einen werden die Schrauben aufgrund der geneigten Anordnung fast ausschließlich auf Zug beansprucht. Zum anderen liegen die Fließgelenke sehr nahe an der Scherfuge wegen der stahlähnlichen Eigenschaften des KPH und der daraus resultierenden Einspannwirkung. Somit ist

auch rechnerisch nachgewiesen, dass, entgegen der ursprünglichen Annahme, nicht der gesamte Querschnitt der Schraube für die Aufnahme der Zugkraft zur Verfügung steht. Daher wird vorgeschlagen, die Zugtragfähigkeit der Schrauben abzumindern. Wertet man das Verhältnis von tatsächlich vorhandener Normalkraft N zu maximal möglicher Normalkraft F_{tens} aus, kommt im Mittel ein Wert von 0,9 heraus (siehe Tabelle A.58 im Anhang A.5). In Bild 7.3 sind die nach Gleichung 7.5 neu berechneten Tragfähigkeiten mit der reduzierten Zugtragfähigkeit mit grünen Rauten eingezeichnet. Der durchschnittliche Verhältniswert von Versuchsergebnissen zu rechnerischer Tragfähigkeit beträgt 1,04 und auch das Bestimmtheitsmaß ist mit R^2 = 0,98 weiter gestiegen.

$$F_{\text{V}} = n \cdot 0,9 \cdot F_{\text{tens}} \cdot (\mu_{adj} \cdot \sin\alpha + \cos\alpha) \tag{7.5}$$

7.3 Weitere Versagensmechanismen

Neben der MN-Interaktion sind auch weitere Versagensmechanismen während der Versuche beobachtet worden, welche berücksichtigt werden müssen. Zum einen muss die Druckfestigkeit in Plattenebene der Verbinder aus KPH ausreichend hoch sein, dass es zu keinem Versagen im Nettoquerschnitt kommt. Zum anderen haben die Versuche mit dem Schwerlastprototyp gezeigt, dass bei dieser Verbindergeometrie auch ein mögliches Querdruckversagen überprüft werden muss. Aufgrund der großen Anzahl an Schrauben auf kleinem Raum entstehen lokal unter den Verbinderplatten sehr große Spannungen rechtwinklig zur Faser.

Somit ergibt sich die Gesamttragfähigkeit der Verbindung mit geneigten Schrauben aus dem Minimum aus Gleichung 7.6:

$$F_{\mathrm{V}} = min \begin{cases} n \cdot F_{\mathrm{ax}} \cdot (\mu_{adj} \cdot \sin\alpha + \cos\alpha) \\ n \cdot 0,9 \cdot F_{\mathrm{tens}} \cdot (\mu_{adj} \cdot \sin\alpha + \cos\alpha) \\ A_{\mathrm{netto,KPH}} \cdot f_{\mathrm{c,0,KPH}} \\ A_{\mathrm{c,90,HT}} \cdot f_{\mathrm{c,90,HT}} \cdot k_{\mathrm{c,90,HT}} \cdot \left(\mu_{adj} + \frac{1}{\tan\alpha}\right) \end{cases} \tag{7.6}$$

mit

n	Verbindungsmittelanzahl
F_{ax}	Herausziehtragfähigkeit einer Schraube
F_{tens}	Zugtragfähigkeit einer Schraube
μ_{adj}	angepasster Reibbeiwert
α	Einschraubwinkel der Schraube gegenüber der Verbinderebene
$A_{\mathrm{netto,KPH}}$	Nettoquerschnittsfläche des Verbinders
$f_{\mathrm{c,0,KPH}}$	Längsdruckfestigkeit des Verbinders
$A_{\mathrm{c,90,HT}}$	querdruckbeanspruchte Fläche unter der Verbinderplatte am HT
$f_{\mathrm{c,90,HT}}$	Querdruckfestigkeit des Hauptträgers
$k_{\mathrm{c,90,HT}}$	Querdruckbeiwert

7.4 Zusammenfassung und Vergleich mit dem Eurocode 5

Es wurde ein analytisches Rechenmodell für die Berechnung der Tragfähigkeit von HT-NT-Verbindungen mit Verbindern aus KPH und aufgerauter Oberfläche vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass das Modell

die Tragfähigkeit sehr gut vorhersagt für sowohl unterschiedliche Oberflächen und Reibbeiwerte als auch für verschiedene Schraubenanzahl und -längen. Durch die Berücksichtigung von Momenten-Normalkraft-Interaktion konnte das Modell weiter verfeinert werden.

Die Tragfähigkeit von Verbindungen mit unter 45° geneigten Schrauben und einem Reibbeiwert von μ = 0,25 berechnet sich nach Gleichung 7.1 zu $F_V = 1{,}25 \cdot F_{ax}/\sqrt{2}$. Wird nun beispielsweise für eine gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster ein charakteristischer Reibbeiwert von μ = 0,80 in Gleichung 7.1 eingesetzt, ergibt sich eine über 40% höhere Tragfähigkeit. Weitere Vergleiche der Reibungskoeffizienten und Tragfähigkeiten mit dem Wert aus dem Eurocode 5 sind in Tabelle 7.3 aufgeführt.

Tabelle 7.3: Vielfaches des Reibbeiwertes und Erhöhung der Tragfähigkeit im Vergleich zum Wert von μ= 0,25 aus dem Eurocode 5.

Oberfläche	Erhöhung des Reibbeiwertes		Steigerung der Tragfähigkeit[1)]	
	SH ⊥	HH	SH ⊥	HH
Gefräst Pyramiden 0,5 mm	2,8	2,8	36%	37%
Gefräst Pyramiden 1,0 mm	3,2	2,7	44%	34%
Gefräst Pyramiden 1,5 mm	3,6	3,6	52%	52%
Gefräst Pyramiden 2,0 mm	3,9	-	58%	-
Gefräst Kreisförmig	3,2	2,6	45%	33%
Geprägt	2,7	2,4	34%	28%

SH = Seitenholz und HH = Hirnholz

1) für geneigte Schrauben mit α = 45°

Literaturverzeichnis

[1] Bejtka, I.; Blaß, H.J. (2002): Joints with Inclined Screws. Paper 35-7-4. CIB W18 - Meeting 35, Kyoto, Japan.

[2] Paulitsch, M.; Barbu, M.C. (2015): Holzwerkstoffe der Moderne. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 1 Auflage.

[3] Wagenführ, A.; Scholz, F. (Hg.) (2018): Taschenbuch der Holztechnik. Carl Hanser Verlag, München, 3 Auflage.

[4] Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (2019): Prüfbericht Nr. 186147 (unveröffentlicht). Holzbau und Baukonstruktionen - Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

[5] Haller, P.; Hamann, M.; Hofmann, M. (2011): Hochleistungsholztragwerke - HHT - Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, technischen Textilien und Formpressholz: Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 0330722A-C. Institut für Stahl- und Holzbau, Dresden.

[6] Brandon, D.; Maluk, C.; Ansell, M.P.; Harris, R.; Walker, P.; Bisby, L.; Bregulla, J. (2015): Fire performance of metal-free timber connections. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, 168(4): S. 173–186.

[7] Popov, V.L. (2015): Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik. Springer Vieweg, Berlin and Heidelberg, 3 Auflage.

[8] Johansen, K.W. (1949): Theory of timber connections. International Association for Bridge and Structural Engineering Bd. 9. S. 249–262.

[9] Girardon, S. (2014): Amélioration des performances mécaniques des assemblages bois sur bois vissés par préparation des interfaces: Application à la réalisation d'éléments de structure. Dissertation, Université de Lorraine.

[10] Schmidt, T. (2018): Kontaktverbindungen für aussteifende Scheiben aus Brettsperrholz, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 33. KIT Scientific Publishing.

[11] Heslot, F.; Baumberger, T.; Perrin, B.; Caroli, B.; Caroli, C. (1994): Creep, stick-slip, and dry-friction dynamics: Experiments and a heuristic model. Physical Review E, 49(6): S. 4973–4988.

[12] Frese, M.; Jordan, M. (2018): Deviations between planned and actual position of wood screws - consequences for minimum spacing: Paper 51-7-1. In Proceedings of the INTER Meeting 51, Tallinn, Estonia.

[13] Blaß, H.J. (2017): Selbstbohrende Schrauben und Systemverbinder – Stand der Technik und Herausforderungen. 23. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen.

[14] Blaß, H.J.; Bejtka, I.; Uibel, T. (2006): Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 4. Universitätsverlag Karlsruhe.

[15] Frese, M.; Fellmoser, P.; Blaß, H.J. (2010): Modelle für die Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben. European Journal of Wood and Wood Products, 68(4): S. 373–384.

[16] Blaß, H.J. (2018): Moment-Normalkraft-Querkraft Interaktion in stiftförmigen Verbindungsmitteln von Stahlblech-Holz-Verbindungen. In Karlsruher Tage 2018 Holzbau, Karlsruhe.

Normen und Zulassungen

[17] ASTM Standard G115-10 (2018) Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[18] DIN 4102-1 (1998) Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.

[19] DIN EN 14358 (2016) Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.

[20] DIN EN 14545 (2009) Holzbauwerke - Nicht stiftförmige Verbindungselemente - Anforderungen. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.

[21] DIN EN 1995-1-1 (2012) Eurocode 5. Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.

[22] DIN EN 26891 (1991) Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983). Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.

[23] DIN EN ISO 4762 (2004) Zylinderschrauben mit Innensechskant (ISO 4762:2004). Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.

[24] ETA-11/0190 (2018) Würth selbstbohrende Schrauben. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin.

[25] ETA-11/0284 (2019) HECO-FIX-plus, HECO-TOPIX, HECO-TOPIX-T und HECO-TOPIX-CC Schrauben. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin.

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

$A_{c,90,HT}$	querdruckbeanspruchte Fläche unter der Verbinderplatte am Hauptträger
$A_{netto,KPH}$	Nettoquerschnittsfläche des Verbinders
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
COV	Variationskoeffizient
d	Schraubendurchmesser
d_{head}	Kopfdurchmesser
$E_{m,0,flat}$	Biegung flachkant, $\parallel$
$E_{m,90,flat}$	Biegung flachkant, $\perp$
$E_{m,0,edge}$	Biegung hochkant, $\parallel$
$E_{m,90,edge}$	Biegung hochkant, $\perp$
$E_{t,0,edge}$	Zug in Platte, $\parallel$
$E_{t,90,edge}$	Zug in Platte, $\perp$
$E_{c,0,edge}$	Druck in Platte, $\parallel$
$E_{c,90,edge}$	Druck in Platte, $\perp$
$f_{m,0,flat}$	Biegung flachkant, $\parallel$
$f_{m,90,flat}$	Biegung flachkant, $\perp$

$f_{m,0,edge}$	Biegung hochkant, $\parallel$
$f_{m,90,edge}$	Biegung hochkant, $\perp$
$f_{t,0,edge}$	Zug in Platte, $\parallel$
$f_{t,90,edge}$	Zug in Platte, $\perp$
$f_{c,0,edge}$	Druck in Platte, $\parallel$
$f_{c,90,edge}$	Druck in Platte, $\perp$
$f_{v,0,flat}$	Schub in Platte, $\perp$
$f_{c,0,KPH}$	Längsdruckfestigkeit des Verbinders
$f_{c,90,HT}$	Querdruckfestigkeit des Hauptträgers
F_1	Kraft senkrecht zur Verbinderplatte (Zug im Nebenträger)
F_2	Kraft in Einschubrichtung
F_3	Kraft entgegen Einschubrichtung
F_{45}	Kraft senkrecht zur Einschubrichtung
$F_{V,test}$	Höchstlast aus Versuch
$F_{V,exp}$	rechnerische Tragfähigkeit
F_{ax}	Herausziehtragfähigkeit einer Schraube
F_{tens}	Zugtragfähigkeit einer Schraube
F_R	Reibkraft parallel zur Reibfläche
F_N	Normalkraft senkrecht zur Reibfläche
$G_{0,flat}$	Schub in Platte, $\perp$
HT-NT	Hauptträger-Nebenträger
$k_{c,90,HT}$	Querdruckbeiwert
k_s	Steifigkeit der Verbindung in Einschubrichtung
k_φ	Drehfedersteifigkeit der Verbindung unter Momentenbelastung
KPH	Kunstharzpressholz

ℓ	Schraubenlänge
M_2	Momentenbeanspruchung im Nebenträger
MEAN	Mittelwert
n	Verbindungsmittelanzahl
SD	Standardabweichung
t	Plattendicke
v	Prüfgeschwindigkeit bei den Reibungsversuchen
v_{max}	Verschiebung bei Höchstlast F_{max}
v_{01}	Verschiebung bei 10% der Höchstlast F_{max}
v_{04}	Verschiebung bei 40% der Höchstlast F_{max}

Griechische Buchstaben

α	Einschraubwinkel der Schraube gegenüber der Verbinderebene
μ_s	statischer Reibungskoeffizient oder Haftungskoeffizient
μ_k	kinetischer Reibungskoeffizient oder Gleitreibungskoeffizient
ρ	Rohdichte
σ_N	Querdruckspannung in der Reibfläche
φ_2	Verdrehung des Nebenträgers

A Anhang

A.1 Schraubenkennwerte

Tabelle A.1: Zugtragfähigkeit in kN der verwendeten Schrauben.

Schraube	5x100	6x100	6x200	8x300	M5x120	M6x120	M10x280
	9,00	15,1	14,3	24,2	12,6	19,4	55,4
	8,93	14,6	14,2	24,0	12,6	19,3	56,1
	9,01	14,6	14,3	23,9	12,8	19,3	55,8
	9,01	15,4	14,1	24,2	12,6	19,4	55,7
	8,89	15,3	14,2	24,2	12,6	19,3	56,3
	8,97	15,5	14,1	-	12,9	-	-
	9,04	15,9	14,2	-	13,0	-	-
	8,89	14,8	14,4	-	12,9	-	-
	8,99	15,6	14,2	-	13,1	-	-
	8,98	15,4	14,1	-	13,0	-	-
	8,86	14,8	14,3	-	-	-	-
	8,99	14,7	14,2	-	-	-	-
	-	-	14,1	-	-	-	-
	-	-	14,1	-	-	-	-
	-	-	14,1	-	-	-	-
MEAN	8,96	15,1	14,2	24,1	12,8	19,3	55,9
SD	0,06	0,43	0,10	0,14	0,19	0,05	0,37
COV	0,6%	2,9%	0,7%	0,6%	1,5%	0,3%	0,7%

Tabelle A.2: Herausziehtragfähigkeit in kN von Holzschrauben d = 6 und 8 mm in Abhängigkeit der Einbindetiefe.

Schraubentyp	Einbindetiefe		
	20 mm	30 mm	40 mm
Normalgewinde	7,60	14,5	15,8
d = 6 mm	7,08	12,5	14,7
	7,93	13,9	15,7
	8,21	12,5	15,0
	7,28	11,1	15,8
MEAN	7,62	12,9	15,4
SD	0,46	1,34	0,51
COV	6%	10%	3%
Grobganggewinde	9,39	14,6	15,5
d = 6 mm	9,54	15,0	15,9
	8,57	14,3	15,8
	9,05	13,1	15,5
	7,97	12,7	14,6
MEAN	8,90	13,9	15,5
SD	0,64	1,01	0,50
COV	7%	7%	3%
Normalgewinde	7,71	14,2	20,7
d = 8 mm	8,95	17,4	21,4
	8,58	15,9	19,5
	9,30	13,1	19,7
	8,28	13,0	23,6
MEAN	8,57	14,7	21,0
SD	0,61	1,90	1,68
COV	7%	13%	8%

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.2**:

Schraubentyp	Einbindetiefe		
	20 mm	30 mm	40 mm
Grobganggewinde	6,93	13,6	21,3
d = 8 mm	7,03	15,6	21,4
	7,61	11,7	21,5
	7,23	14,3	15,4
	7,07	11,9	17,2
MEAN	7,17	13,4	19,4
SD	0,27	1,61	2,86
COV	4%	12%	15%

Tabelle A.3: Herausziehtragfähigkeit in kN von Schrauben mit metrischem Gewinde in Abhängigkeit der Einbindetiefe.

Einbindetiefe	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm
Schraubentyp	M5	M5	M6	M10
	5,26	7,61	12,4	30,4
	4,98	7,09	12,3	28,0
	5,41	6,94	13,8	27,9
	5,15	8,78	13,7	27,6
	5,20	7,59	13,5	26,9
	4,90	8,63	-	-
	3,73	5,93	-	-
	5,06	7,79	-	-
	5,71	9,33	-	-
	5,89	11,0	-	-
MEAN	5,13	8,07	13,1	28,2
SD	0,58	1,44	0,70	1,34
COV	11%	18%	5%	5%

Tabelle A.4: Kopfdurchziehtragfähigkeit in kN in Abhängigkeit der Plattendicke.

Schraubentyp		Plattendicke			
		6 mm	10 mm	15 mm	25 mm
6 mm	Senkfrästaschenkopf	4,92	8,53	14,4	16,5
		4,53	10,3	15,3	15,6
		4,19	7,99	15,2	14,7
	MEAN	4,55	8,93	15,0	15,6
	SD	0,37	1,19	0,49	0,88
	COV	8%	13%	3%	6%
8 mm	Senkfrästaschenkopf	5,16	9,81	20,5	24,1
		5,09	11,3	20,8	24,8
		5,24	10,6	20,9	24,5
	MEAN	5,16	10,6	20,7	24,5
	SD	0,08	0,74	0,22	0,36
	COV	2%	7%	1%	2%

Tabelle A.5: Lochleibungsfestigkeit N/mm^2 in Abhängigkeit von der Plattendicke.

Schraubentyp		Plattendicke		
		6 mm	10 mm	15 mm [1)]
6 mm	Vollgewinde	285	235	-
		302	215	-
		305	227	-
		273	233	-
		297	237	-
		293	239	-
		297	-	-
		307	-	-
		300	-	-
		297	-	-
	MEAN	296	231	-
	SD	10,1	8,9	-
	COV	3%	4%	-
8 mm	Vollgewinde	229	169	-
		255	168	-
		220	167	-
		224	169	-
		-	160	-
		-	165	-
		-	168	-
	MEAN	232	167	-
	SD	15,7	3,1	-
	COV	7%	2%	-

[1)] Für Versuche mit 15 mm Platte konnte keine Lochleibungsfestigkeit ermittelt werden, da sich Fließgelenke in den Schrauben einstellten.

A.2 Reibbeiwerte

Tabelle A.6: Reibbeiwerte für glatte (unbehandelte) Oberfläche und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{\text{N,max}}$ kN	σ_{N} N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
1.1.1	5,36	11,7	1,14	1	0,20	0,19
1.1.2	4,67	11,2	1,11	1	0,19	0,19
1.1.3	4,37	11,3	1,07	1	0,19	0,19
1.2.1	6,96	14,6	1,39	5	0,22	0,20
1.2.2	6,67	15,8	1,38	5	0,20	0,20
1.2.3	5,67	13,5	1,26	5	0,19	0,19
1.3.1	4,25	12,2	1,18	10	0,17	0,16
1.3.2	3,47	10,6	1,06	10	0,16	0,16
1.3.3	4,21	11,7	1,15	10	0,17	0,17
1.4.1	9,49	24,9	2,29	1	0,19	0,19
1.4.2	11,4	24,9	2,48	1	0,21	0,20
1.4.3	13,4	24,8	2,39	1	0,28	0,26
1.4.4	13,1	25,1	2,47	1	0,25	0,26
1.5.1	11,9	26,0	2,57	5	0,23	0,18
1.5.2	9,69	26,5	2,52	5	0,19	0,18
1.5.3	11,5	25,2	2,37	5	0,24	0,22
1.6.1	12,5	25,5	2,49	10	0,25	0,23
1.6.2	11,0	26,8	2,68	10	0,20	0,20
1.6.3	10,7	26,7	2,66	10	0,20	0,20
1.7.1	5,96	14,9	5,72	1	0,19	0,16
1.7.2	5,86	14,9	5,28	1	0,19	0,17
1.7.3	7,81	15,6	6,11	1	0,23	0,19
1.7.4	6,92	15,9	6,21	1	0,21	0,17
1.8.1	6,03	15,4	6,01	5	0,20	0,17
1.8.2	6,18	15,3	5,73	5	0,22	0,18

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.6**:

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
1.8.3	6,49	15,5	6,01	5	0,21	0,18
1.8.4	6,27	16,5	6,28	5	0,20	0,17
1.9.1	5,61	15,0	5,99	10	0,19	0,16
1.9.2	5,16	15,4	5,68	10	0,18	0,16
1.9.3	6,01	15,9	6,10	10	0,20	0,17
1.9.4	5,83	16,2	6,36	10	0,18	0,17
MIN					0,16	0,16
MAX					0,28	0,26
MEAN					0,20	0,19
SD					0,03	0,03
COV					13%	14%

Tabelle A.7: Reibbeiwerte für glatte (unbehandelte) Oberfläche und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
1.11.1	2,29	5,85	1,17	1	0,18	0,18
1.11.2	2,00	5,29	1,05	1	0,18	0,18
1.11.3	2,31	5,82	1,16	1	0,18	0,18
1.12.1	2,12	5,54	1,10	5	0,19	0,19
1.12.2	2,50	5,81	1,15	5	0,22	0,19
1.12.3	2,53	5,91	1,18	5	0,21	0,19
1.13.1	1,88	5,76	1,13	10	0,17	0,14
1.13.2	2,13	6,02	1,19	10	0,17	0,17
1.13.3	2,27	5,51	1,10	10	0,21	0,19
1.14.1	5,49	13,2	2,58	1	0,18	0,18
1.14.2	6,85	13,5	2,70	1	0,25	0,20
1.14.3	5,76	13,5	2,67	1	0,19	0,18
1.15.1	5,26	12,9	2,49	5	0,21	0,18
1.15.2	4,55	12,9	2,58	5	0,18	0,16
1.15.3	4,89	13,7	2,73	5	0,18	0,17
1.16.1	4,77	13,2	2,63	10	0,18	0,17
1.16.2	5,77	13,4	2,67	10	0,22	0,19
1.16.3	5,59	13,3	2,67	10	0,21	0,20
1.17.1	10,7	30,3	5,96	1	0,16	0,16
1.17.2	10,5	30,7	6,06	1	0,15	0,16
1.17.3	11,3	31,9	6,37	1	0,16	0,17
1.18.1	10,6	30,7	6,14	5	0,17	0,17
1.18.2	11,3	32,1	6,33	5	0,16	0,17
1.18.3	11,7	32,7	6,41	5	0,16	0,18

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.7**:

1.19.1	12,2	31,5	6,31	10	0,19	0,17
1.19.2	11,6	31,8	6,36	10	0,18	0,17
1.19.3	11,7	31,1	6,16	10	0,19	0,19
MIN					0,15	0,14
MAX					0,25	0,20
MEAN					0,19	0,18
SD					0,02	0,01
COV					12%	8%

Tabelle A.8: Reibbeiwerte für geschliffene Oberfläche und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
2.1	22,3	25,8	2,47	5	0,44	0,26
2.2	24,3	25,6	2,16	5	0,54	0,37
2.3	21,2	25,3	2,04	5	0,51	0,33
2.4	26,7	24,4	2,05	5	0,65	0,48
2.5	27,4	24,1	2,37	5	0,58	0,43
2.6	25,0	25,1	1,79	5	0,63	0,52
MIN					0,44	0,26
MAX					0,65	0,52
MEAN					0,56	0,40
SD					0,08	0,10
COV					14%	25%

Tabelle A.9: Reibbeiwerte für geschliffene Oberfläche und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
2.11	8,08	13,2	2,57	5	0,31	0,23
2.12	10,9	12,9	2,53	5	0,43	0,40
2.13	12,9	13,4	2,63	5	0,49	0,39
2.14	14,5	13,4	2,64	5	0,55	0,42
2.15	12,4	13,1	2,59	5	0,48	0,44
2.16	14,5	13,2	2,65	5	0,55	0,45
MIN					0,31	0,23
MAX					0,55	0,45
MEAN					0,47	0,39
SD					0,09	0,08
COV					19%	21%

Tabelle A.10: Reibbeiwerte für sandgestrahlte Oberfläche und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
3.1	17,6	25,8	2,16	5	0,41	0,35
3.2	24,2	24,3	2,26	5	0,53	0,42
3.3	20,5	26,3	2,30	5	0,41	0,36
3.4	24,7	26,2	2,32	5	0,53	0,48
3.5	19,2	25,1	2,13	5	0,45	0,44
3.6	27,4	27,8	2,32	5	0,59	0,38
MIN					0,41	0,35
MAX					0,59	0,48
MEAN					0,49	0,41
SD					0,07	0,05
COV					15%	12%

Tabelle A.11: Reibbeiwerte für sandgestrahlte Oberfläche und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
3.11	8,46	12,9	2,29	5	0,37	0,35
3.12	11,7	13,7	2,44	5	0,48	0,46
3.13	12,0	13,0	2,47	5	0,48	0,46
3.14	12,4	13,0	2,50	5	0,50	0,47
3.15	14,1	13,2	2,56	5	0,55	0,47
3.16	12,0	13,0	2,57	5	0,44	0,46
MIN					0,37	0,35
MAX					0,55	0,47
MEAN					0,47	0,44
SD					0,06	0,05
COV					13%	10%

Tabelle A.12: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit 2K-Epoxidharz und Quarzsand (0-2 mm) und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
4.1	23,7	25,2	1,59	5	0,63	0,37
4.2	28,7	30,0	1,78	5	0,73	0,49
4.3	25,7	25,7	2,21	5	0,56	0,36
MIN					0,56	0,36
MAX					0,73	0,49
MEAN					0,64	0,41
SD					0,08	0,07
COV					13%	17%

Tabelle A.13: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit 2K-Epoxidharz und Quarzsand (0-2 mm) und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
4.11	10,2	13,3	2,23	5	0,48	0,34
4.12	11,3	13,0	2,14	5	0,53	0,33
4.13	11,5	12,5	1,86	5	0,61	0,38
MIN					0,48	0,33
MAX					0,61	0,38
MEAN					0,54	0,35
SD					0,07	0,02
COV					12%	7%

Tabelle A.14: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit 2K-Epoxidharz und Kiessplitt (2-4 mm) und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
5.1	25,1	25,0	1,81	5	0,66	0,42
5.2	21,4	24,7	1,87	5	0,55	0,36
5.3	27,5	25,0	2,23	5	0,60	0,35
MIN					0,55	0,35
MAX					0,66	0,42
MEAN					0,61	0,38
SD					0,05	0,04
COV					9%	10%

Tabelle A.15: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit 2K-Epoxidharz und Kiessplitt (2-4 mm) und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
5.11	9,16	12,5	1,39	5	0,66	0,50
5.12	10,4	12,8	1,39	5	0,73	0,54
5.13	9,54	12,6	1,38	5	0,68	0,48
MIN					0,66	0,48
MAX					0,73	0,54
MEAN					0,69	0,51
SD					0,04	0,03
COV					5%	6%

Tabelle A.16: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit dünnem EpoxyTape (0,1 mm) und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{\text{N,max}}$ kN	σ_{N} N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
6.1	38,8	25,2	2,05	5	0,94	0,70
6.2	33,8	24,0	2,20	5	0,77	0,61
6.3	27,6	24,3	1,80	5	0,75	0,57
MIN					0,75	0,57
MAX					0,94	0,70
MEAN					0,82	0,62
SD					0,10	0,07
COV					12%	11%

Tabelle A.17: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit dünnem EpoxyTape (0,1 mm) und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{\text{N,max}}$ kN	σ_{N} N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
6.11	20,2	13,1	2,39	5	0,84	0,66
6.12	13,4	12,5	1,28	5	1,02	0,65
6.13	13,0	12,0	1,22	5	1,06	0,73
MIN					0,84	0,65
MAX					1,06	0,73
MEAN					0,97	0,68
SD					0,12	0,04
COV					12%	6%

Tabelle A.18: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit dickem EpoxyTape (1,0 mm) und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
7.1	21,6	24,0	2,28	5	0,47	0,39
7.2	31,0	25,1	2,07	5	0,75	0,53
7.3	26,9	27,1	2,53	5	0,53	0,36
7.4	40,6	26,3	2,66	5	0,76	0,64
7.5	30,5	24,5	2,12	5	0,71	0,56
MIN					0,47	0,36
MAX					0,76	0,64
MEAN					0,65	0,50
SD					0,13	0,12
COV					21%	23%

Tabelle A.19: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit dickem EpoxyTape (1,0 mm) und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
7.11	15,0	11,6	1,86	5	0,79	0,61
7.12	15,8	11,6	1,97	5	0,78	0,61
7.13	14,4	12,2	1,60	5	0,88	0,61
MIN					0,78	0,61
MAX					0,88	0,61
MEAN					0,82	0,61
SD					0,05	0,00
COV					6%	1%

Tabelle A.20: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit Griptape und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
8.1	10,5	23,1	2,13	5	0,25	0,13
8.2	10,2	24,4	2,35	5	0,22	0,10
8.3	13,2	25,7	2,55	5	0,26	0,07
MIN					0,22	0,07
MAX					0,26	0,13
MEAN					0,24	0,10
SD					0,02	0,03
COV					9%	29%

Tabelle A.21: Reibbeiwerte für beschichtete Oberfläche mit Griptape und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
8.11	2,24	3,26	0,29	5	0,39	0,11
8.12	8,56	24,3	2,33	5	0,18	0,09
8.13	5,50	12,1	1,17	5	0,24	0,09
8.14	4,83	6,09	0,53	5	0,45	0,09
MIN					0,18	0,09
MAX					0,45	0,11
MEAN					0,32	0,10
SD					0,13	0,01
COV					40%	7%

Tabelle A.22: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 0,5 mm und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
9.1.1	34,3	26,6	2,35	5	477	0,73	0,46
9.2.1	31,1	25,3	1,91	5	475	0,81	-
9.3.1	28,8	26,9	2,31	5	467	0,62	0,48
9.4.1	34,3	27,3	2,03	5	458	0,84	0,61
9.5.1	30,4	25,4	2,21	5	454	0,69	0,37
9.6.1	33,1	25,6	1,97	5	449	0,81	0,48
9.7.1	27,2	24,9	1,91	5	446	0,71	0,36
9.8.1	32,5	26,4	2,05	5	445	0,76	0,66
9.9.1	34,0	29,0	1,85	5	446	0,85	0,50
9.10.1	28,0	25,3	1,44	5	443	0,96	0,52
9.11.1	30,7	26,4	2,40	5	504	0,64	0,54
9.12.1	35,8	27,1	2,32	5	494	0,74	0,53
9.13.1	38,3	30,7	2,66	5	493	0,71	-
9.14.1	41,1	30,6	2,76	5	487	0,75	0,60
9.15.1	41,1	30,0	1,84	5	483	0,93	0,63
9.16.1	36,9	28,3	1,98	5	382	0,93	0,60
9.17.1	37,1	28,6	2,20	5	381	0,83	0,69
9.18.1	33,0	28,1	1,95	5	399	0,85	0,57
9.19.1	33,3	30,2	2,20	5	393	0,76	0,42
9.20.1	38,1	29,4	1,82	5	385	1,03	0,54
9.21.1	14,0	10,5	2,95	5	416	0,94	0,67
9.22.1	15,7	12,2	3,17	5	413	0,99	0,64
9.23.1	21,6	20,1	6,26	5	410	0,68	0,65
9.24.1	18,4	17,0	3,95	5	408	0,93	0,60
9.25.1	20,2	16,7	4,16	5	407	0,96	0,50
9.26.1	18,9	18,7	4,07	5	552	0,86	0,55
9.27.1	22,3	17,3	4,41	5	547	0,99	0,49
9.28.1	21,1	20,6	3,87	5	563	0,89	0,51

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.22**:

9.29.1	19,8	17,2	5,18	5	559	0,76	0,44
9.30.1	30,4	19,8	7,29	5	556	0,82	0,52
9.31.1	36,9	25,4	1,71	5	489	1,06	0,51
9.32.1	33,7	25,5	1,56	5	452	1,07	0,56
9.33.1	42,2	26,0	2,14	5	448	0,96	0,61
9.34.1	33,0	26,3	1,96	5	438	0,83	0,76
9.35.1	31,9	26,2	1,76	5	433	0,88	0,62
9.36.1	26,4	26,2	1,42	5	431	0,81	0,67
9.37.1	42,2	25,0	2,34	5	417	0,90	0,59
9.38.1	38,4	27,1	1,92	5	415	0,81	0,55
9.39.1	38,4	27,1	2,31	5	409	0,81	0,75
9.40.1	37,4	26,1	2,45	5	406	0,76	0,57
MIN					381	0,62	0,36
MAX					563	1,07	0,76
MEAN					453	0,84	0,56
SD					51	0,11	0,09
COV					11%	14%	17%

Tabelle A.23: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 0,5 mm und Seitenholz (parallel).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
9.1.2	38,8	28,9	2,18	5	428	0,87	0,55
9.2.2	39,3	29,1	2,41	5	428	0,81	0,47
9.3.2	35,5	27,2	2,06	5	429	0,86	0,64
9.4.2	35,7	27,1	2,19	5	432	0,78	0,52
9.5.2	38,6	28,6	2,21	5	436	0,87	-
9.6.2	32,5	27,7	2,16	5	442	0,75	0,45
9.7.2	41,3	29,3	2,39	5	442	0,86	0,54
9.8.2	33,4	28,4	2,10	5	439	0,79	0,39
9.9.2	34,0	28,1	2,24	5	436	0,75	0,48
9.10.2	37,4	26,9	2,15	5	438	0,87	0,57
MIN					428	0,75	0,39
MAX					442	0,87	0,64
MEAN					435	0,82	0,51
SD					5	0,05	0,07
COV					1%	6%	14%

Tabelle A.24: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 0,5 mm und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
9.1.3	29,1	29,6	3,91	5	517	0,71	0,66
9.2.3	30,1	28,1	3,42	5	502	0,75	0,59
9.3.3	31,1	32,2	3,99	5	491	0,74	0,65
9.4.3	29,4	28,1	3,50	5	486	0,82	0,60
9.5.3	24,4	26,6	3,03	5	486	0,79	0,65
9.6.3	26,6	26,2	2,83	5	478	0,81	0,65
9.7.3	27,1	28,5	3,71	5	475	0,73	0,62
9.8.3	30,4	31,4	3,82	5	473	0,80	0,67
9.9.3	31,2	30,1	3,66	5	471	0,82	0,68
9.10.3	29,5	29,7	3,44	5	470	0,85	0,63
9.11.3	11,6	12,4	1,25	5	383	0,91	0,47
9.12.3	14,1	13,1	1,51	5	384	0,90	0,58
9.13.3	13,7	12,7	1,42	5	389	0,96	0,66
9.14.3	14,9	13,5	1,44	5	401	1,03	0,60
9.15.3	11,8	12,4	1,28	5	457	0,91	0,54
9.16.3	12,6	12,7	1,50	5	467	0,80	0,44
9.17.3	12,6	12,6	1,27	5	469	0,90	0,56
9.18.3	13,4	13,1	1,75	5	489	0,76	0,49
9.19.3	14,1	13,3	1,52	5	574	0,88	0,56
9.20.3	15,3	12,7	1,66	5	597	0,89	0,53
9.21.3	13,3	13,0	1,83	5	426	0,72	0,64
9.22.3	12,5	13,0	1,41	5	430	0,83	0,67
9.23.3	14,2	13,4	1,88	5	433	0,75	0,62
9.24.3	13,3	12,5	1,62	5	434	0,78	0,64
9.25.3	12,2	12,5	1,55	5	435	0,78	0,64
9.26.3	14,2	12,8	1,60	5	437	0,89	0,65
9.27.3	13,1	13,6	1,76	5	439	0,75	0,59

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.24**:

9.28.3	14,2	12,8	1,72	5	240	0,82	0,65
9.29.3	14,2	13,2	1,71	5	443	0,79	0,60
9.30.3	13,2	13,7	1,85	5	448	0,71	0,49
MIN					240	0,71	0,44
MAX					597	1,03	0,68
MEAN					454	0,82	0,60
SD					63	0,08	0,06
COV					14%	10%	11%

Tabelle A.25: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 1,0 mm und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
10.1.1	31,2	24,2	1,55	5	-	0,93	0,78
10.2.1	35,9	26,3	1,51	5	-	1,12	0,67
10.3.1	34,4	24,2	1,95	5	-	0,86	0,70
10.4.1	31,4	27,7	1,82	5	-	0,83	0,59
10.5.1	31,6	25,1	2,10	5	-	0,73	0,70
10.6.1	32,8	26,0	1,79	5	-	0,91	0,62
10.7.1	34,9	25,4	1,52	5	-	1,12	0,55
10.8.1	38,2	24,8	1,68	5	-	1,13	0,73
10.9.1	31,5	26,4	1,64	5	-	0,89	0,73
10.10.1	41,8	25,5	1,86	5	-	1,12	-
10.11.1	32,7	24,6	1,98	5	-	0,83	0,60
10.12.1	34,1	24,4	1,85	5	-	0,92	0,62
10.13.1	39,4	37,5	1,95	5	422	1,00	0,74
10.14.1	41,6	38,9	2,48	5	426	0,81	0,66
10.15.1	38,0	34,1	2,07	5	419	0,86	0,59
MIN					419	0,73	0,55
MAX					426	1,13	0,78
MEAN					422	0,94	0,66
SD					4	0,13	0,07
COV					1%	14%	10%

Tabelle A.26: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 1,0 mm und Seitenholz (parallel).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
10.1.2	44,3	27,1	2,17	5	376	1,01	0,43
10.2.2	36,1	24,5	1,97	5	368	0,91	0,40
10.3.2	37,9	25,1	2,08	5	361	0,91	0,38
10.4.2	41,8	25,7	2,26	5	353	0,92	0,45
10.5.2	41,2	25,3	2,18	5	343	0,94	0,41
10.6.2	50,2	24,5	2,06	5	334	1,22	0,42
10.7.2	42,3	24,8	2,15	5	328	0,98	0,40
10.8.2	40,0	25,0	2,04	5	338	0,98	0,51
10.9.2	37,7	24,7	2,09	5	339	0,90	0,39
10.10.2	35,3	22,4	1,95	5	322	0,90	0,44
10.11.2	29,7	26,6	2,06	5	453	0,72	0,56
10.12.2	37,0	26,2	2,17	5	463	0,85	0,57
10.13.2	34,2	27,3	2,04	5	467	0,83	0,59
10.14.2	33,7	26,3	1,96	5	483	0,86	0,63
10.15.2	37,5	29,5	2,30	5	385	0,81	0,44
10.16.2	28,1	31,3	2,16	5	400	0,65	0,39
10.17.2	41,3	30,2	2,45	5	402	0,84	0,53
10.18.2	39,0	29,1	2,14	5	445	0,91	0,65
10.19.2	35,3	28,9	2,30	5	468	0,76	0,53
10.20.2	35,0	29,2	2,24	5	448	0,78	0,60
MIN					322	0,65	0,38
MAX					483	1,22	0,65
MEAN					393	0,88	0,49
SD					55	0,12	0,09
COV					14%	14%	18%

Tabelle A.27: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 1,0 mm und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
10.1.3	26,4	33,6	2,03	5	312	0,65	0,58
10.2.3	26,8	32,9	2,24	5	318	0,59	0,64
10.3.3	18,2	16,1	0,88	5	320	1,04	0,66
10.4.3	21,9	26,5	1,35	5	321	0,75	0,64
10.5.3	23,6	25,4	1,36	5	323	0,86	0,69
10.6.3	22,3	24,6	1,40	5	326	0,80	0,75
10.7.3	22,0	27,1	1,48	5	328	0,72	0,63
10.8.3	24,4	26,0	1,52	5	330	0,80	0,76
10.9.3	24,0	24,8	1,27	5	336	0,93	0,67
10.10.3	26,9	27,1	1,62	5	364	0,83	0,62
MIN					312	0,59	0,58
MAX					364	1,04	0,76
MEAN					327	0,80	0,66
SD					14	0,13	0,06
COV					4%	16%	8%

Tabelle A.28: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 1,5 mm und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
11.1.1	28,6	25,9	1,18	5	1,18	0,66
11.2.1	33,0	25,4	1,51	5	1,07	0,52
11.3.1	29,7	25,7	1,48	5	0,97	0,50
11.4.1	26,3	25,5	1,33	5	0,98	0,53
11.5.1	30,9	26,9	1,25	5	1,09	0,62
11.6.1	34,1	25,5	1,58	5	1,07	0,62
11.7.1	37,9	25,5	1,39	5	1,36	0,56
11.8.1	28,9	26,1	1,25	5	1,12	0,63
11.9.1	27,4	26,3	1,39	5	0,99	0,46
11.10.1	29,5	25,2	1,58	5	0,92	0,45
11.11.1	29,0	28,0	1,22	5	0,98	0,64
11.12.1	36,0	25,9	1,64	5	1,08	0,62
11.13.1	28,8	25,5	1,30	5	1,11	-
11.14.1	32,0	25,1	1,45	5	1,08	0,55
11.15.1	16,6	15,1	3,42	5	0,96	0,51
11.16.1	17,3	15,5	3,33	5	1,03	0,53
11.17.1	20,1	15,3	3,46	5	1,15	0,59
11.18.1	18,9	15,9	4,28	5	0,85	0,55
11.19.1	17,1	15,2	3,35	5	1,01	0,53
11.20.1	20,9	15,0	3,39	5	1,21	0,56
MIN					0,85	0,45
MAX					1,36	0,66
MEAN					1,06	0,56
SD					0,11	0,06
COV					11%	11%

Tabelle A.29: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 1,5 mm und Seitenholz (parallel).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
11.1.2	37,2	23,5	1,98	5	338	0,94	0,43
11.2.2	48,4	24,4	1,98	5	339	1,21	0,44
11.3.2	46,5	23,6	2,01	5	322	1,15	0,45
11.4.2	50,5	26,0	1,95	5	328	1,28	0,39
11.5.2	42,9	24,0	1,79	5	334	1,19	0,45
11.6.2	46,4	26,1	1,98	5	343	1,17	0,47
11.7.2	51,1	25,5	2,11	5	353	1,20	0,45
11.8.2	34,8	24,8	1,99	5	361	0,87	0,33
11.9.2	44,3	25,5	1,95	5	368	1,13	0,38
11.10.2	44,3	27,0	2,07	5	376	1,07	0,42
11.12.2	37,8	24,4	1,96	5	463	0,97	0,65
11.13.2	36,5	28,2	2,19	5	467	0,83	0,58
11.14.2	30,2	23,1	1,83	5	483	0,82	0,51
11.15.2	30,1	25,2	1,92	5	385	0,78	0,36
11.16.2	45,9	27,0	2,16	5	400	1,06	0,43
11.17.2	45,7	25,8	1,94	5	402	1,18	0,51
11.18.2	36,8	23,2	2,12	5	445	0,84	0,72
11.19.2	36,3	24,0	1,94	5	468	0,93	0,55
11.20.2	41,8	27,4	2,37	5	448	0,88	0,55
MIN					322	0,78	0,33
MAX					483	1,28	0,72
MEAN					390	1,03	0,48
SD					55	0,16	0,10
COV					14%	16%	21%

Tabelle A.30: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 1,5 mm und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
11.1.3	19,2	14,3	1,33	5	1,24	0,48
11.2.3	13,5	12,7	1,32	5	1,02	0,41
11.3.3	16,8	12,8	1,36	5	1,23	0,39
11.4.3	14,6	12,8	1,29	5	1,12	0,34
11.5.3	15,9	13,1	1,38	5	1,14	0,42
11.6.3	15,2	12,7	1,32	5	1,15	0,48
11.7.3	16,6	13,0	1,43	5	1,16	0,44
11.8.3	14,3	12,9	1,44	5	0,99	0,38
11.9.3	13,8	12,9	1,50	5	0,92	0,30
11.10.3	15,8	12,9	1,45	5	1,09	0,33
11.11.3	14,6	13,6	1,43	5	1,02	0,36
11.12.3	13,5	12,9	1,24	5	1,09	0,44
11.13.3	30,4	30,2	6,25	5	0,96	0,61
11.14.3	29,8	30,4	6,93	5	0,86	0,71
11.15.3	34,3	30,3	6,80	5	1,01	0,44
11.16.3	29,6	30,4	6,21	5	0,95	0,44
11.17.3	33,0	30,4	5,77	5	1,14	0,53
11.18.3	33,4	30,5	6,72	5	0,99	0,49
MIN					0,86	0,30
MAX					1,24	0,71
MEAN					1,06	0,44
SD					0,11	0,10
COV					10%	23%

Tabelle A.31: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Pyramidenmuster 2,0 mm und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
12.1.1	36,1	25,0	1,33	5	1,35	0,81
12.2.1	36,5	25,1	1,62	5	1,12	0,76
12.3.1	36,4	24,7	1,56	5	1,13	0,77
12.4.1	39,9	24,5	1,58	5	1,26	1,09
12.5.1	38,1	25,3	1,46	5	1,29	0,77
12.6.1	32,8	26,9	1,78	5	0,88	0,71
12.7.1	40,6	25,6	1,55	5	1,23	0,87
12.8.1	37,7	24,5	1,62	5	1,13	0,84
12.9.1	35,1	30,1	1,71	5	0,86	0,81
12.10.1	37,3	25,4	1,49	5	1,21	0,83
12.11.1	39,5	23,7	1,52	5	1,22	-
12.12.1	38,2	24,3	1,60	5	1,15	-
MIN					0,86	0,71
MAX					1,35	1,09
MEAN					1,15	0,83
SD					0,15	0,10
COV					13%	13%

Tabelle A.32: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit kreisförmigen Muster und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
13.1.1	28,8	25,1	1,78	5	-	0,80	0,39
13.2.1	49,3	26,5	2,51	5	-	0,98	0,53
13.3.1	43,8	25,7	2,06	5	-	1,06	0,51
13.4.1	28,8	21,9	1,70	5	-	0,85	0,54
13.5.1	40,7	26,4	2,10	5	466	0,94	0,62
13.6.1	42,0	26,2	1,97	5	451	1,03	0,71
13.7.1	35,1	25,0	2,21	5	441	0,79	0,60
13.8.1	33,8	24,3	1,53	5	434	0,97	0,77
13.9.1	38,0	26,4	1,77	5	432	0,96	0,76
13.10.1	33,9	24,8	2,09	5	421	0,77	0,75
13.11.1	39,5	25,3	1,99	5	416	0,98	0,67
13.12.1	31,6	25,1	1,78	5	412	0,88	0,86
13.13.1	32,3	26,5	2,65	5	407	0,61	0,69
13.14.1	26,4	23,8	1,59	5	404	0,83	0,58
MIN					404	0,61	0,39
MAX					466	1,06	0,86
MEAN					428	0,89	0,64
SD					20	0,12	0,13
COV					5%	14%	20%

Tabelle A.33: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit kreisförmigen Muster und Seitenholz (parallel).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
13.1.2	37,4	25,3	2,15	5	400	0,87	0,50
13.2.2	28,8	25,6	2,05	5	508	0,69	0,50
13.3.2	32,0	25,6	1,85	5	394	0,86	0,53
13.4.2	28,7	24,9	2,04	5	511	0,69	0,44
13.5.2	33,3	22,5	1,81	5	394	0,92	0,52
13.6.2	36,7	26,1	2,17	5	457	0,84	0,57
13.7.2	31,4	25,9	2,15	5	437	0,73	0,50
13.8.2	34,6	26,3	2,21	5	438	0,78	0,43
13.9.2	35,7	25,1	1,99	5	395	0,89	0,59
13.10.2	27,6	25,4	2,03	5	390	0,68	0,37
13.11.2	34,2	25,5	2,04	5	400	0,83	0,53
13.12.2	30,4	25,6	2,16	5	489	0,70	0,37
13.13.2	31,7	22,6	1,97	5	432	0,81	0,55
13.14.2	31,5	25,6	2,11	5	451	0,74	0,43
13.15.2	33,2	24,7	2,17	5	417	0,76	0,50
13.16.2	29,1	26,2	2,05	5	502	0,70	0,47
13.17.2	37,9	28,1	2,33	5	515	0,80	0,49
13.18.2	36,7	27,0	2,21	5	438	0,82	0,51
13.19.2	36,0	26,1	2,13	5	423	0,84	0,54
13.20.2	29,7	25,2	2,15	5	414	0,69	0,44
MIN					390	0,68	0,37
MAX					515	0,92	0,59
MEAN					440	0,78	0,49
SD					43	0,08	0,06
COV					10%	10%	12%

Tabelle A.34: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit kreisförmigen Muster und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
13.1.3	16,1	12,4	2,06	5	-	0,78	0,54
13.2.3	12,2	13,0	1,92	5	-	0,63	0,50
13.3.3	17,1	12,8	1,84	5	-	0,93	0,58
13.4.3	14,3	13,1	1,67	5	428	0,84	0,62
13.5.3	17,1	14,1	1,81	5	430	0,94	0,63
13.6.3	14,3	13,0	1,87	5	433	0,76	0,59
13.7.3	15,2	13,5	1,87	5	435	0,81	0,63
13.8.3	15,9	13,8	1,98	5	436	0,80	0,65
13.9.3	15,7	13,1	1,76	5	438	0,88	0,64
13.10.3	15,3	13,5	1,77	5	439	0,86	0,62
13.11.3	14,4	13,6	1,86	5	441	0,77	0,58
13.12.3	16,8	13,6	1,93	5	445	0,81	0,70
13.13.3	16,3	13,0	1,88	5	453	0,86	0,72
MIN					428	0,63	0,50
MAX					453	0,94	0,72
MEAN					438	0,82	0,62
SD					7	0,08	0,06
COV					2%	10%	9%

Tabelle A.35: Reibbeiwerte für gefräste Oberfläche mit Schuppenmuster und Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin}
14.1.1	22.0	30.0	1.81	5	0.59	0.42
14.2.1	23.8	27.7	1.82	5	0.65	0.38
14.3.1	19.2	29.7	2.50	5	0.38	0.25
14.4.1	22.8	29.3	1.83	5	0.58	0.36
14.5.1	24.0	29.2	1.71	5	0.68	0.38
14.6.1	25.2	28.6	1.85	5	0.67	0.56
14.7.1	32.6	30.5	2.17	5	0.75	0.65
14.8.1	44.3	28.2	2.79	5	0.69	0.82
14.9.1	24.0	27.2	2.09	5	0.57	0.35
14.10.1	21.2	27.2	2.00	5	0.53	0.35
MIN					0.38	0.25
MAX					0.75	0.82
MEAN					0.61	0.45
SD					0.10	0.17
COV					17%	38%

Tabelle A.36: Reibbeiwerte für geprägte Oberfläche mit Seitenholz (rechtwinklig).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
15.1.1	41,5	30,0	2,98	5	443	0,69	0,70
15.2.1	34,1	27,8	2,31	5	446	0,74	0,50
15.3.1	34,1	27,0	2,70	5	445	0,62	0,48
15.4.1	23,0	26,2	2,22	5	446	0,51	0,31
15.5.1	31,8	26,8	2,10	5	449	0,75	0,44
15.6.1	37,1	25,7	2,15	5	454	0,85	0,65
15.7.1	38,7	26,9	2,46	5	458	0,78	0,52
15.8.1	35,3	28,0	1,93	5	467	0,86	0,40
15.9.1	40,0	25,2	2,27	5	475	0,86	0,51
15.10.1	30,3	24,7	1,67	5	477	0,91	0,66
15.11.1	35,2	28,2	2,35	5	385	0,75	0,47
15.12.1	34,5	26,6	2,25	5	399	0,76	0,60
15.13.1	34,7	26,4	2,10	5	381	0,81	0,49
15.14.1	33,0	25,1	1,81	5	382	0,89	0,51
15.15.1	40,4	27,6	1,91	5	483	1,04	0,73
15.16.1	33,3	29,3	2,01	5	506	0,83	0,62
15.17.1	49,6	30,4	2,56	5	494	0,94	0,66
15.18.1	34,8	27,9	2,27	5	493	0,77	0,69
15.19.1	34,3	27,7	2,08	5	487	0,81	0,64
15.20.1	34,1	28,4	2,26	5	393	0,74	0,43
15.21.1	18,6	17,9	4,99	5	407	0,74	0,40
15.22.1	19,2	17,3	4,95	5	408	0,76	0,55
15.23.1	14,8	14,9	3,71	5	410	0,77	0,49
15.24.1	20,2	16,5	5,20	5	413	0,74	0,56
15.25.1	16,5	17,4	4,65	5	416	0,69	0,48
15.26.1	19,5	18,8	5,85	5	552	0,66	0,36
15.27.1	18,1	19,8	4,75	5	547	0,67	0,33

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.36**:

15.28.1	30,8	19,6	6,63	5	563	0,92	0,44
15.29.1	19,6	20,5	4,42	5	559	0,81	0,42
15.30.1	19,6	20,3	4,24	5	556	0,87	0,47
MIN					381	0,51	0,31
MAX					563	1,04	0,73
MEAN					460	0,79	0,52
SD					56	0,10	0,11
COV					12%	13%	22%

Tabelle A.37: Reibbeiwerte für geprägte Oberfläche mit Seitenholz (parallel).

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
15.1.2	28,9	29,1	2,10	5	439	0,69	0,52
15.2.2	31,5	29,1	2,27	5	442	0,69	0,56
15.3.2	31,0	28,2	2,28	5	440	0,68	0,47
15.4.2	27,2	25,5	2,12	5	437	0,64	0,52
15.5.2	38,3	27,6	2,21	5	432	0,86	0,59
15.6.2	37,4	29,1	2,48	5	436	0,75	0,51
15.7.2	28,0	28,6	2,18	5	429	0,64	0,46
15.8.2	29,0	31,3	2,56	5	428	0,57	0,44
15.9.2	30,3	27,5	2,27	5	422	0,66	0,53
15.10.2	26,4	29,0	2,43	5	426	0,54	0,41
MIN					422	0,54	0,41
MAX					442	0,86	0,59
MEAN					433	0,67	0,50
SD					7	0,09	0,06
COV					2%	13%	11%

Tabelle A.38: Reibbeiwerte für geprägte Oberfläche und Hirnholz.

Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	ρ kg/m^3	μ_{stat} -	μ_{kin} -
15.1.3	30,9	28,4	4,27	5	405	0,72	0,57
15.2.3	29,6	22,2	3,81	5	407	0,77	0,69
15.3.3	34,0	31,5	5,26	5	409	0,64	0,53
15.4.3	36,7	30,4	5,04	5	431	0,72	0,53
15.5.3	36,6	29,2	4,98	5	435	0,74	0,52
15.6.3	29,6	29,1	4,33	5	474	0,68	0,62
15.7.3	35,6	29,8	5,25	5	522	0,67	0,47
15.8.3	34,7	30,9	5,60	5	530	0,62	0,57
15.9.3	29,9	29,1	5,09	5	533	0,59	0,54
15.10.3	36,8	30,2	5,42	5	546	0,68	0,55
15.11a.3	38,3	30,5	5,53	5	548	0,69	0,53
15.11b.3	12,3	12,7	1,58	5	383	0,75	0,43
15.12.3	12,4	12,9	1,68	5	384	0,71	0,38
15.13.3	13,8	12,5	1,77	5	389	0,77	0,54
15.14.3	12,3	11,4	1,60	5	401	0,77	0,46
15.15.3	13,1	11,6	1,70	5	457	0,77	0,51
15.16.3	11,8	12,3	1,81	5	467	0,64	0,46
15.17.3	13,1	12,3	1,88	5	469	0,69	0,46
15.18.3	14,9	11,6	2,00	5	489	0,75	0,46
15.19.3	14,2	12,1	2,07	5	574	0,68	0,49
15.20.3	19,3	13,4	2,38	5	597	0,80	0,53
MIN					383	0,59	0,38
MAX					597	0,80	0,69
MEAN					469	0,71	0,52
SD					67	0,06	0,07
COV					14%	8%	13%

Tabelle A.39: Reibbeiwerte für Aluminium und Seitenholz (rechtwinklig).

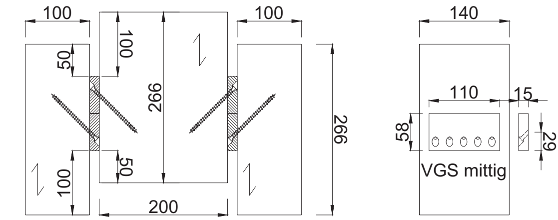
Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
16.1.1	13,4	25,3	2,22	5	0,30	0,28
16.2.1	13,4	25,1	2,22	5	0,30	0,30
16.3.1	16,0	27,1	2,60	5	0,30	0,27
16.4.1	20,7	25,0	2,12	5	0,43	0,47
16.5.1	27,4	27,3	2,44	5	0,50	0,57
16.6.1	23,8	26,0	2,37	5	0,45	0,51
16.7.1	7,36	12,4	1,04	5	0,32	0,35
16.8.1	7,43	12,4	0,93	5	0,39	0,43
16.9.1	8,65	12,4	0,82	5	0,49	0,54
16.10.1	8,00	12,4	1,12	5	0,33	0,36
16.11.1	10,9	13,1	1,20	5	0,39	0,42
16.12.1	9,81	13,5	1,14	5	0,39	0,43
MIN					0,30	0,27
MAX					0,50	0,57
MEAN					0,38	0,41
SD					0,07	0,10
COV					19%	24%

Tabelle A.40: Reibbeiwerte für Aluminium und Hirnholz.

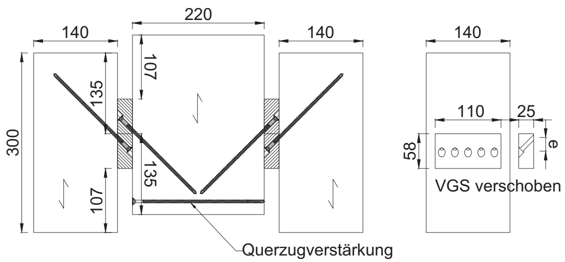
Versuch	F_{max} kN	$F_{N,max}$ kN	σ_N N/mm^2	v mm/min	μ_{stat} -	μ_{kin} -
16.1.3	11,1	12,9	1,26	5	0,39	0,44
16.2.3	10,6	12,9	1,23	5	0,40	0,43
16.3.3	10,8	12,7	1,21	5	0,40	0,44
16.4.3	10,4	12,8	1,19	5	0,39	0,43
16.5.3	11,4	13,1	1,28	5	0,38	0,43
16.6.3	12,6	13,0	1,28	5	0,44	0,47
16.7.3	11,3	13,1	1,20	5	0,44	0,46
16.8.3	11,6	12,9	1,22	5	0,46	0,47
16.9.3	11,6	12,9	1,21	5	0,49	0,46
16.10.3	10,4	12,9	1,13	5	0,44	0,44
16.11.3	11,5	12,8	1,20	5	0,45	0,47
16.12.3	11,4	12,8	1,20	5	0,44	0,47
MIN					0,38	0,43
MAX					0,49	0,47
MEAN					0,43	0,45
SD					0,03	0,02
COV					8%	4%

A.3 Druck-Scher-Versuche

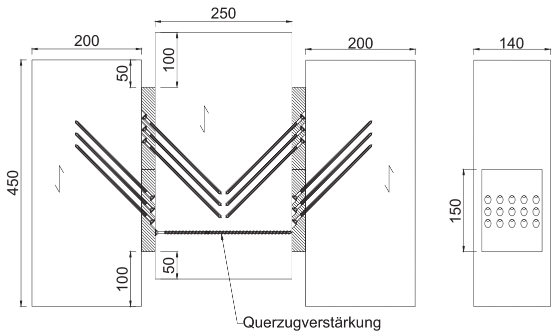
Vorversuche Reihe 1 bis Reihe 5



Prüfkörper mit 5 Schrauben 5x100.



Prüfkörper mit 5 Schrauben 6x180 (verschoben).



Prüfkörper mit 15 Schrauben 6x100 bzw. 6x200.

Bild A.1: Prüfkörper der Vorversuche Reihe 1 bis Reihe 5.

Tabelle A.41: Einzelergebnisse Versuche mit 5 Schrauben 5x100.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Glatt (unbehandelt)					
1.1.1	39,7	3,93	3,94	16,5	17,6
1.1.2	41,2	5,69	5,58	16,5	16,4
1.1.3	40,7	5,17	4,62	15,4	17,8
MEAN	40,5	4,93	4,71	16,2	17,3
SD	0,77	0,91	0,83	0,61	0,75
COV	2%	18%	18%	4%	4%
Geschliffen					
1.2.1	51,9	6,47	7,53	19,5	14,2
1.2.2	50,5	7,50	8,29	14,0	12,6
1.2.3	48,6	6,11	5,75	18,3	19,1
MEAN	50,3	6,69	7,19	17,3	15,4
SD	1,62	0,72	1,30	2,88	3,28
COV	3%	11%	18%	17%	21%
Sandgestrahlt					
1.3.1	48,6	5,44	5,63	21,5	20,0
1.3.2	51,1	5,91	4,99	16,6	17,9
1.3.3	52,0	6,26	5,83	14,7	16,7
MEAN	50,6	5,87	5,48	17,6	18,2
SD	1,74	0,41	0,44	3,54	1,68
COV	3%	7%	8%	20%	9%

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.41**:

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
EpoxyTape (0,1 mm)					
1.6.1	58,3	7,44	7,24	13,7	12,9
1.6.2	56,4	7,93	7,37	13,1	14,3
1.6.3	58,6	7,60	7,09	12,4	13,6
MEAN	57,8	7,66	7,23	13,1	13,6
SD	1,23	0,25	0,14	0,65	0,70
COV	2%	3%	2%	5%	5%
EpoxyTape (1,0 mm)					
1.7.1	49,8	6,96	6,64	10,4	10,2
1.7.2	54,3	8,10	8,23	10,3	10,2
1.7.3	53,0	7,81	7,10	10,6	11,9
MEAN	52,3	7,62	7,32	10,4	10,7
SD	2,35	0,59	0,82	0,13	0,99
COV	4%	8%	11%	1%	9%
Griptape					
1.8.1	36,6	7,18	5,20	9,66	12,1
1.8.2	40,4	6,79	6,66	11,9	11,4
1.8.3	40,0	6,83	6,64	11,5	12,0
MEAN	39,0	6,93	6,17	11,0	11,9
SD	2,12	0,21	0,84	1,21	0,38
COV	5%	3%	14%	11%	3%

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.41**:

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Gefräst Pyramidenmuster 1,0 mm					
1.10.1	55,7	6,84	6,94	14,5	15,4
1.10.2	48,3	6,11	6,75	17,0	16,0
1.10.3	54,7	7,61	7,64	15,7	15,2
MEAN	52,9	6,85	7,11	15,7	15,5
SD	4,01	0,75	0,47	1,23	0,39
COV	8%	11%	7%	8%	3%
Gefräst Pyramidenmuster 1,5 mm					
1.11.1	52,7	6,83	6,96	12,8	12,5
1.11.2	52,7	7,29	9,09	12,3	11,0
1.11.3	55,0	7,66	8,32	12,7	12,0
MEAN	53,4	7,26	8,12	12,6	11,8
SD	1,33	0,42	1,08	0,26	0,81
COV	2%	6%	13%	2%	7%
Gefräst Pyramidenmuster 2,0 mm					
1.12.1	50,5	8,90	6,73	11,1	12,1
1.12.2	54,6	8,19	9,24	11,9	10,6
1.12.3	53,3	12,24	9,48	9,25	10,7
MEAN	52,8	9,77	8,48	10,8	11,2
SD	2,06	2,17	1,52	1,36	0,83
COV	4%	22%	18%	13%	7%

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.41**:

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Gefräst kreisförmiges Muster					
1.13.1	50,0	5,61	5,27	15,8	16,8
1.13.2	50,0	6,45	6,23	15,1	13,4
1.13.3	49,7	6,35	5,61	14,2	13,0
MEAN	49,9	6,14	5,70	15,0	14,4
SD	0,21	0,46	0,48	0,78	2,06
COV	0%	7%	8%	5%	14%

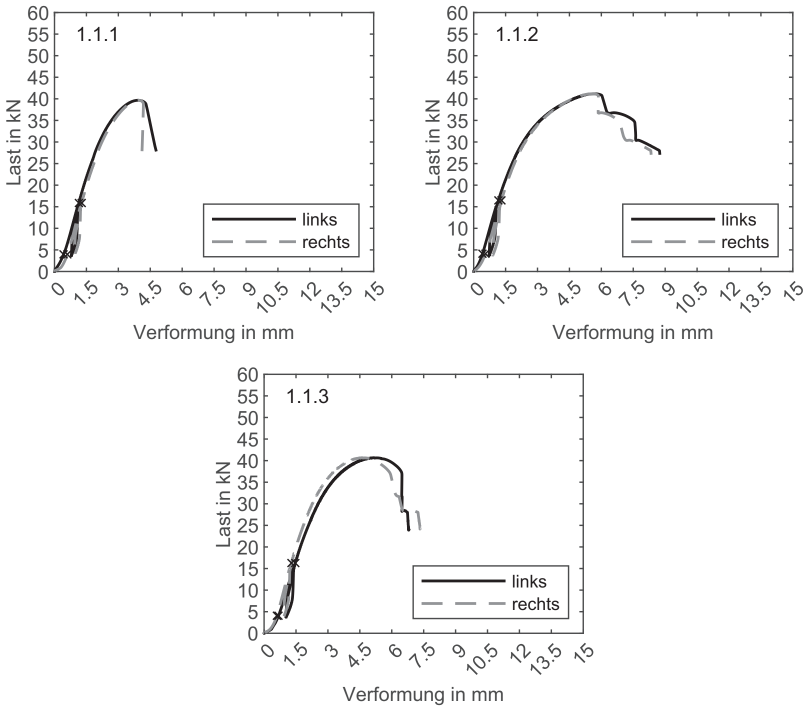


Bild A.2: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.1 (glatt).

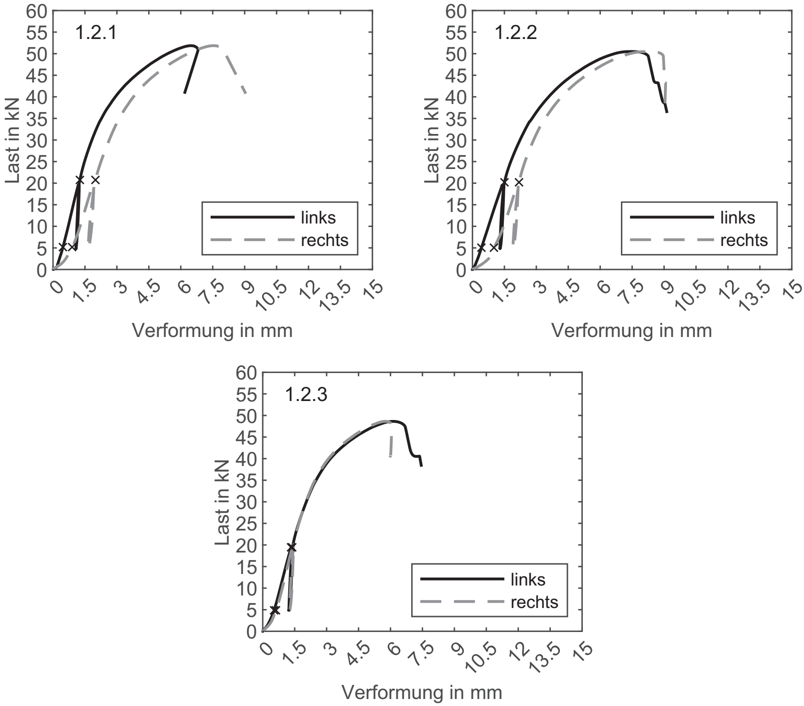


Bild A.3: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.2 (geschliffen).

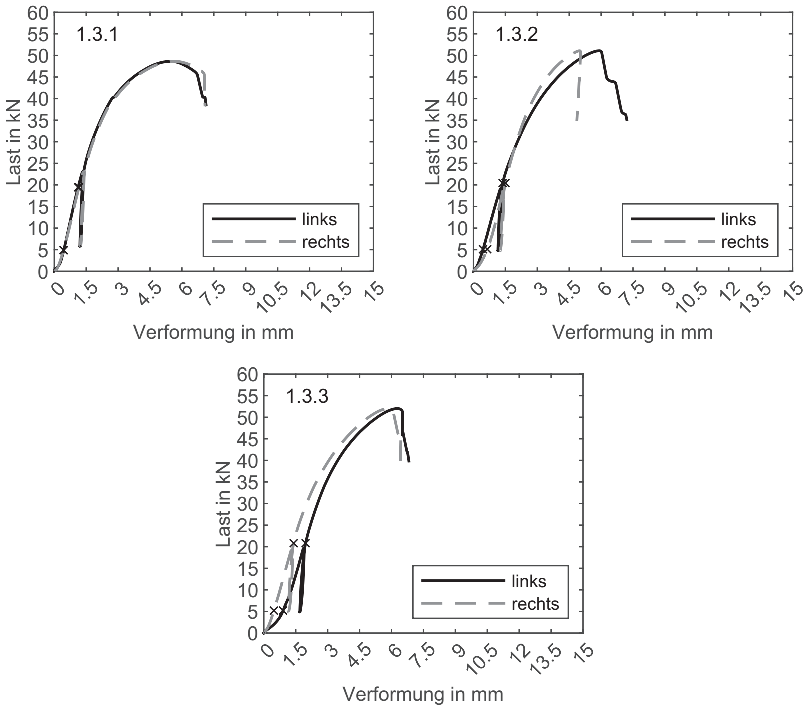


Bild A.4: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.3 (sandgestrahlt).

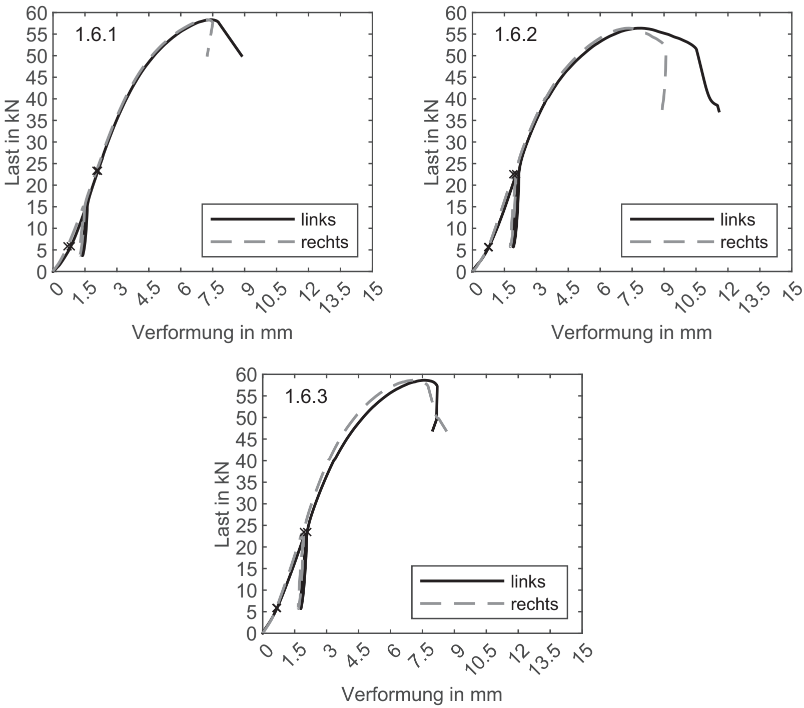


Bild A.5: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.6 (EpoxyTape 0,1 mm).

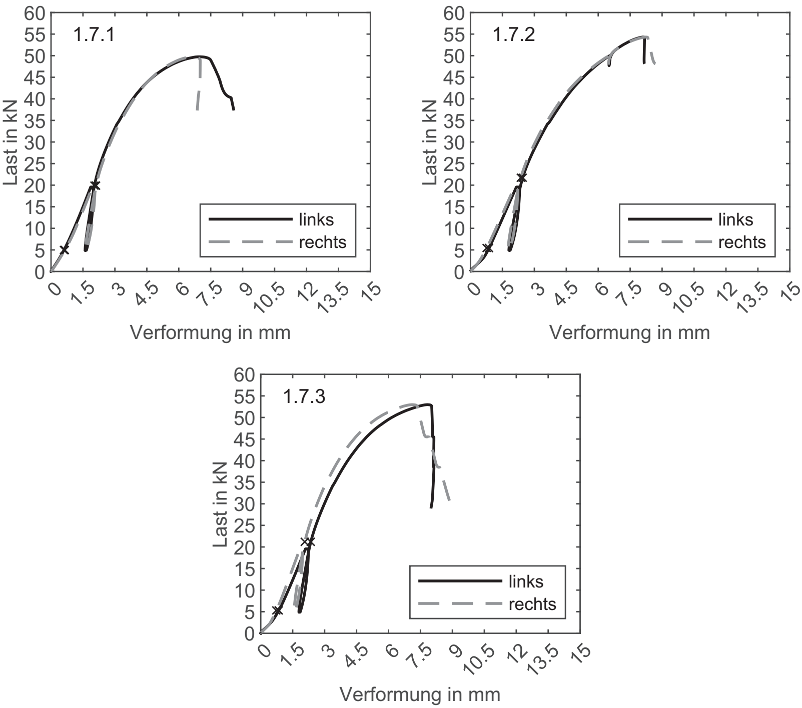


Bild A.6: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.7 (EpoxyTape 1,0 mm).

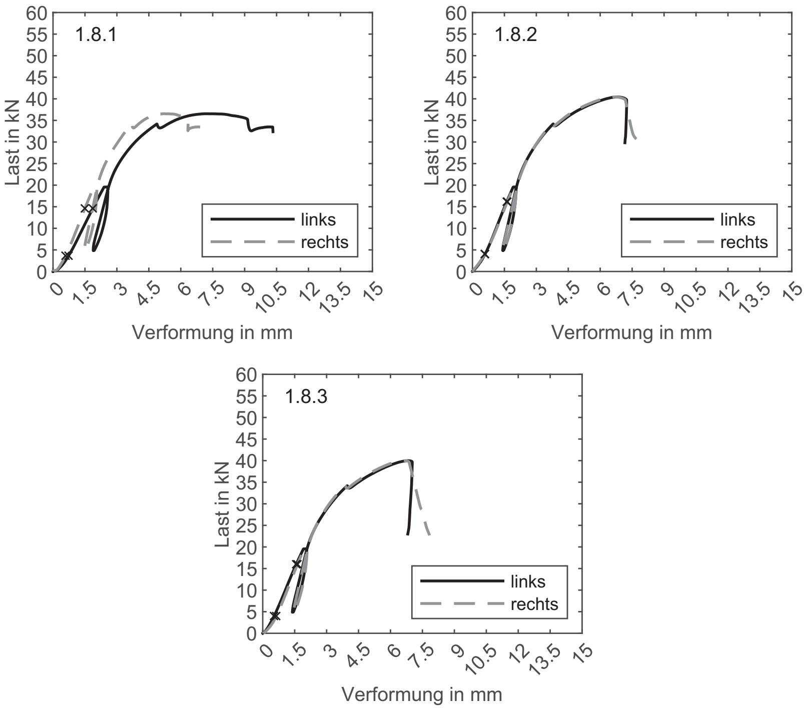


Bild A.7: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.8 (Griptape).

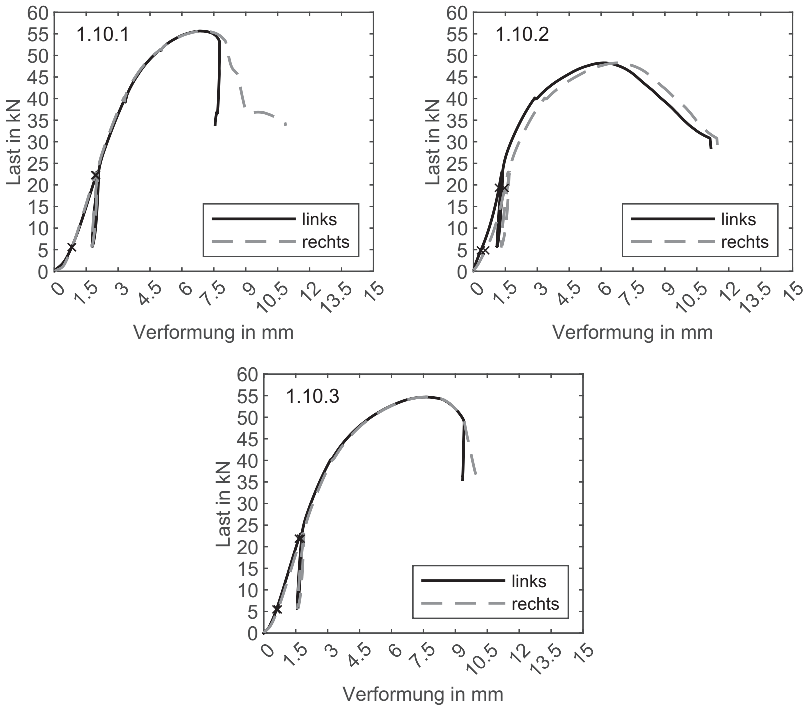


Bild A.8: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.10 (Pyramiden 1,0 mm).

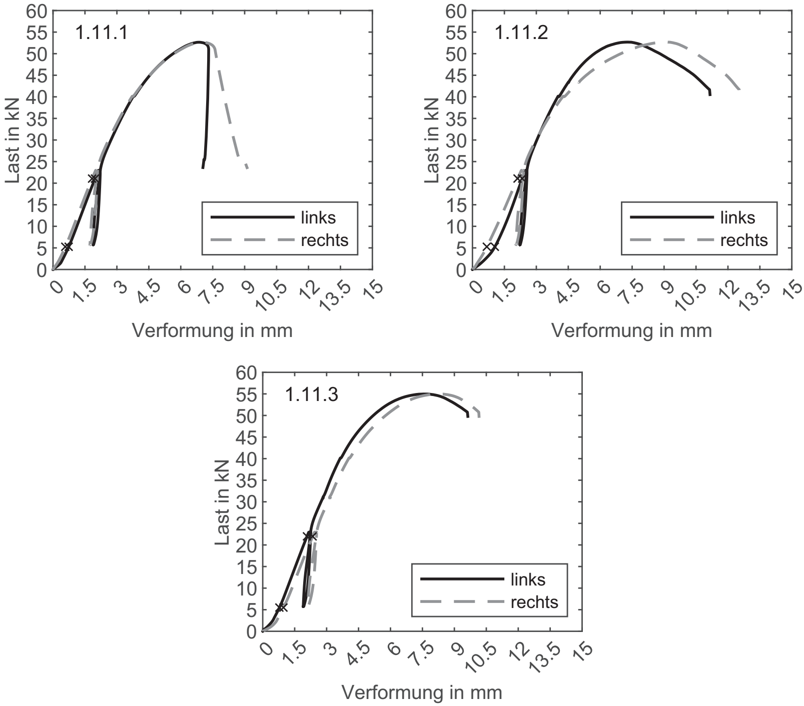


Bild A.9: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.11 (Pyramiden 1,5 mm).

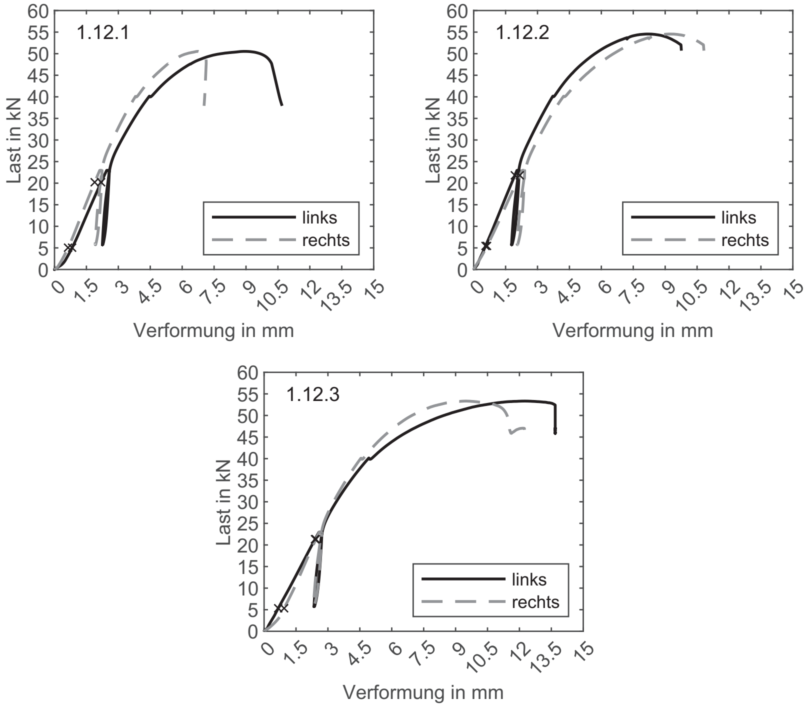


Bild A.10: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.12 (Pyramiden 2,0 mm).

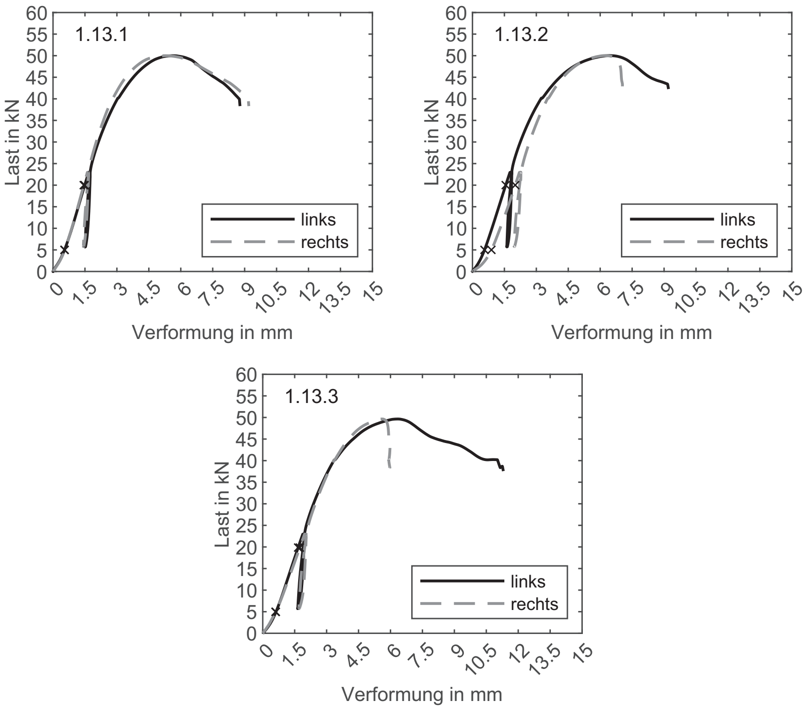


Bild A.11: Last-Verschiebungskurven Reihe 1.13 (gefräst kreisförmig).

Tabelle A.42: Einzelergebnisse Reihe 2: Versuche mit 5 Schrauben 5x100 (verschoben).

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Gefräst Pyramidenmuster 1,0 mm					
2.10.1	47,8	5,85	5,70	12,4	12,8
2.10.2	48,9	-	-	9,20	14,4
2.10.3	47,0	-	-	15,1	12,3
2.10.4	46,0	5,16	4,35	14,5	17,2
2.10.5	55,7	6,39	6,21	17,9	15,1
MIN	46,0	5,16	4,35	9,20	12,3
MAX	55,7	6,39	6,72	17,9	17,2
MEAN	49,1	5,80	5,93	13,8	14,4
SD	3,83	0,62	0,97	3,25	1,96
COV	8%	11%	16%	24%	14%
Gefräst Pyramidenmuster 1,5 mm					
2.11.1[1)]	10,9	28,9	29,9	7728	8395
2.11.2	49,0	5,82	4,83	12,5	22,3
2.11.3	41,4	4,63	4,85	13,2	12,6
2.11.4	54,4	5,52	5,21	13,9	15,5
2.11.5	46,4	4,21	4,49	15,8	14,5
MIN	41,4	4,21	4,49	12,5	12,6
MAX	54,4	5,82	5,21	15,8	22,3
MEAN	47,8	5,05	4,85	13,9	16,2
SD	5,42	0,75	0,30	1,41	4,21
COV	11%	15%	6%	10%	26%

1) Versuchskörper falsch eingebaut, Schrauben auf Druck beansprucht.

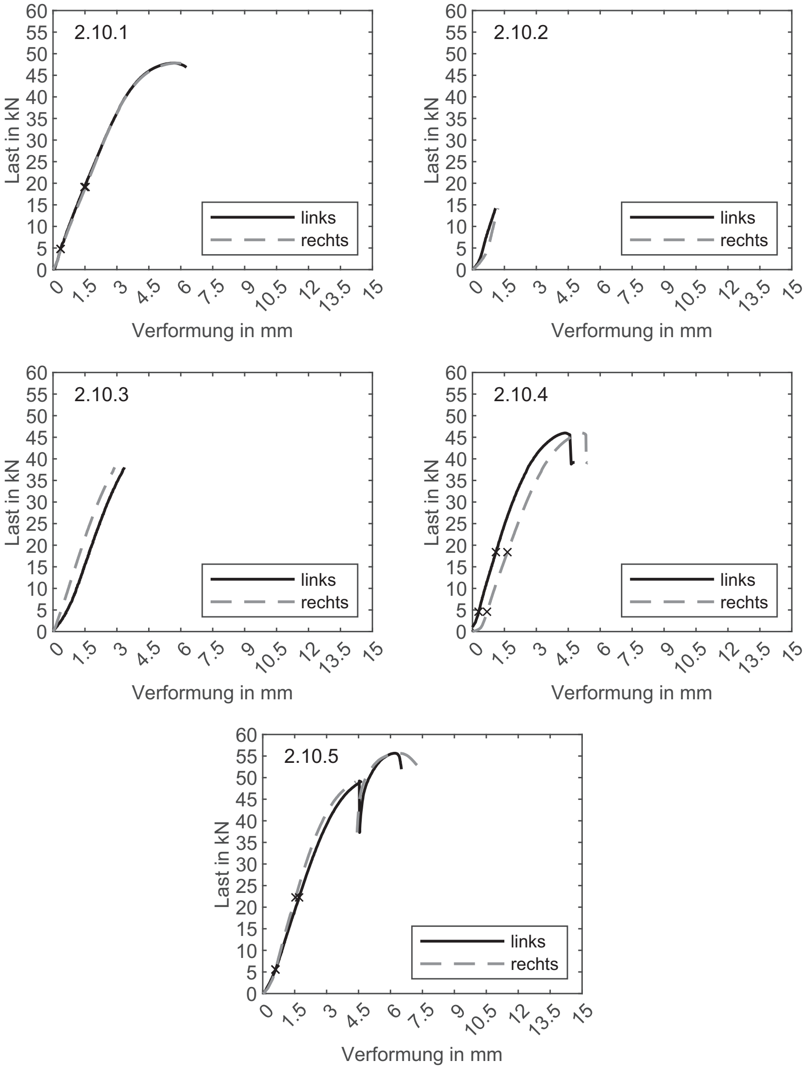


Bild A.12: Last-Verschiebungskurven Reihe 2.10 (Pyramiden 1,0 mm).

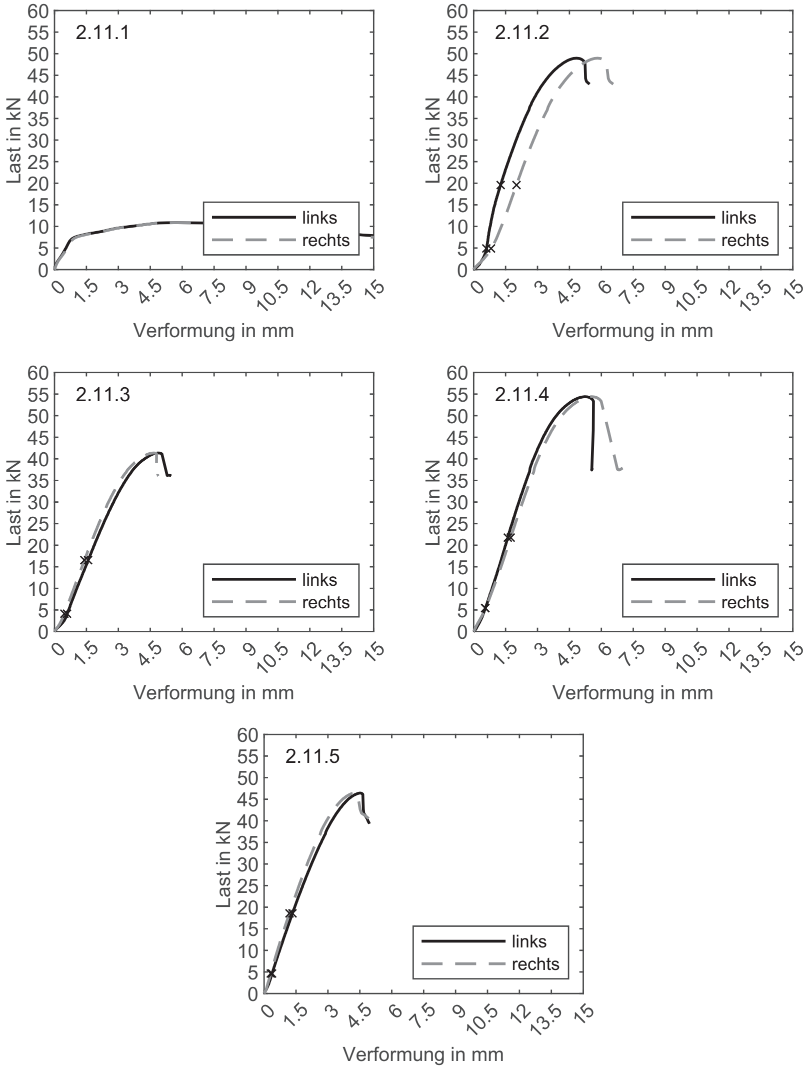


Bild A.13: Last-Verschiebungskurven Reihe 2.11 (Pyramiden 1,5 mm).

Tabelle A.43: Einzelergebnisse Reihe 3: Versuche mit 5 Schrauben 6x180 (verschoben).

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Gefräst Pyramidenmuster 0,5 mm					
3.9.1	88,8	17,6	14,0	18,5	19,6
3.9.2	87,1	12,4	12,0	16,8	17,2
3.9.3	84,1	11,3	11,4	16,7	16,9
3.9.4	75,5	6,75	6,51	19,4	19,1
3.9.5	86,9	10,4	9,33	16,6	17,5
MIN	75,5	6,75	6,51	16,6	16,9
MAX	88,8	17,6	14,0	19,4	19,6
MEAN	84,5	11,7	10,6	17,6	18,1
SD	5,29	3,91	2,86	1,29	1,21
COV	6%	33%	27%	7%	7%
Gefräst kreisförmiges Muster					
3.13.1	79,5	8,40	8,07	15,0	15,0
3.13.2	79,5	9,82	9,52	18,1	17,3
3.13.3	77,9	7,47	8,49	19,7	18,5
3.13.4	83,4	-	9,75	-	19,3
3.13.5	79,5	-	7,95	-	18,6
MIN	77,9	7,47	7,95	15,0	15,0
MAX	83,4	9,82	9,75	19,1	19,3
MEAN	80,0	8,57	8,75	17,6	17,7
SD	2,06	1,18	0,83	2,36	1,71
COV	3%	14%	9%	13%	10%

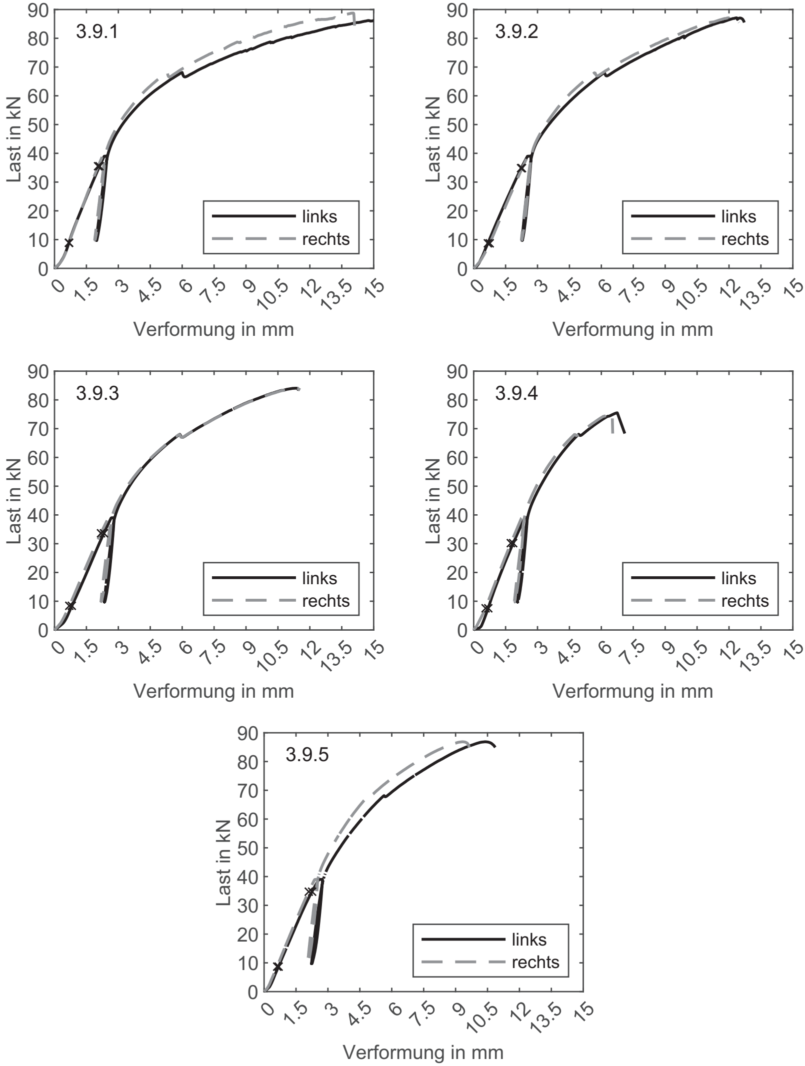


Bild A.14: Last-Verschiebungskurven Reihe 3.9 (Pyramiden 0,5 mm).

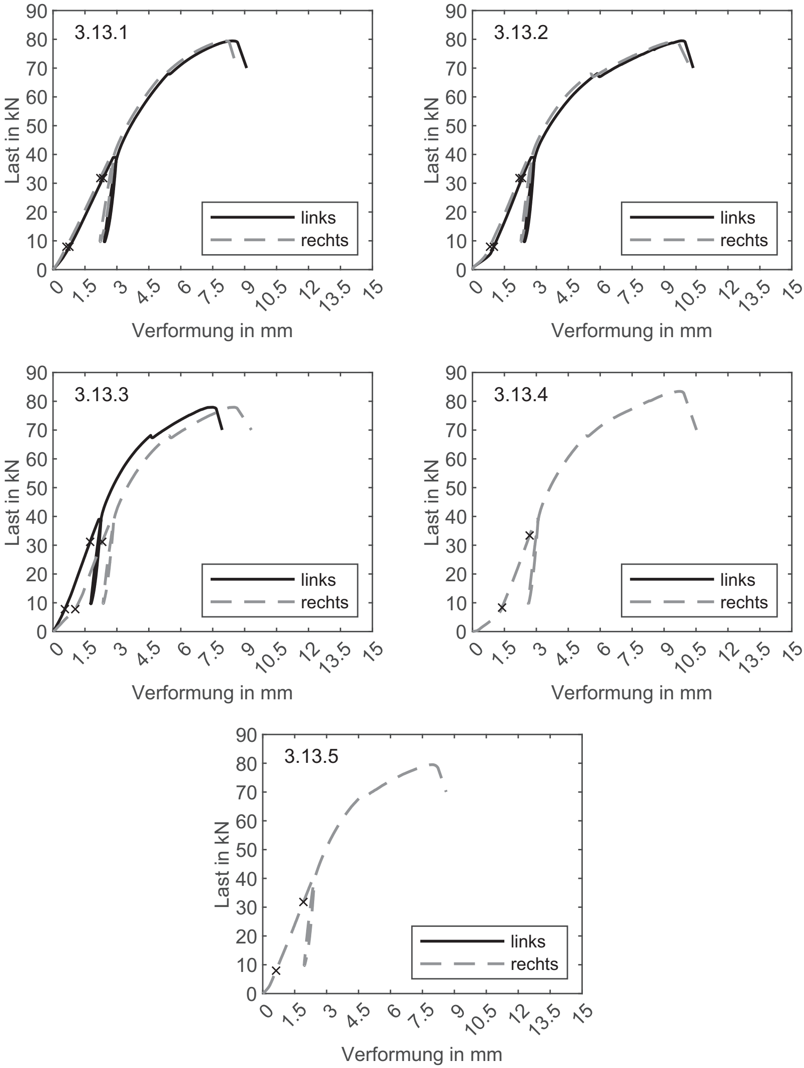


Bild A.15: Last-Verschiebungskurven Reihe 3.13 (kreisförmiges Muster).

Tabelle A.44: Einzelergebnisse Reihe 4: Versuche mit 15 Schrauben 6x100.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Gefräst Pyramidenmuster 0,5 mm					
4.9.1	152	6,33	6,87	35,7	37,8
4.9.2	153	7,66	7,55	33,4	37,2
4.9.3	154	7,36	7,51	33,8	30,7
4.9.4	159	7,15	8,32	37,0	29,5
4.9.5	148	6,42	7,70	37,0	28,1
MIN	148	6,33	6,87	33,4	28,1
MAX	159	7,66	8,32	37,0	37,8
MEAN	153	6,98	7,59	35,4	32,7
SD	3,91	0,59	0,52	1,72	4,54
COV	3%	8%	7%	5%	14%
Geprägt					
4.15.1	143	7,49	8,46	48,7	37,7
4.15.2	138	4,65	5,11	59,5	46,1
4.15.3	144	6,38	7,19	48,0	32,0
4.15.4	139	5,36	5,44	48,1	39,7
4.15.5	138	5,96	6,75	36,7	29,8
MIN	138	4,65	5,11	36,7	29,8
MAX	144	7,49	8,46	59,5	46,1
MEAN	140	5,97	6,59	48,2	37,1
SD	2,89	1,07	1,36	8,06	6,46
COV	2%	18%	21%	17%	17%

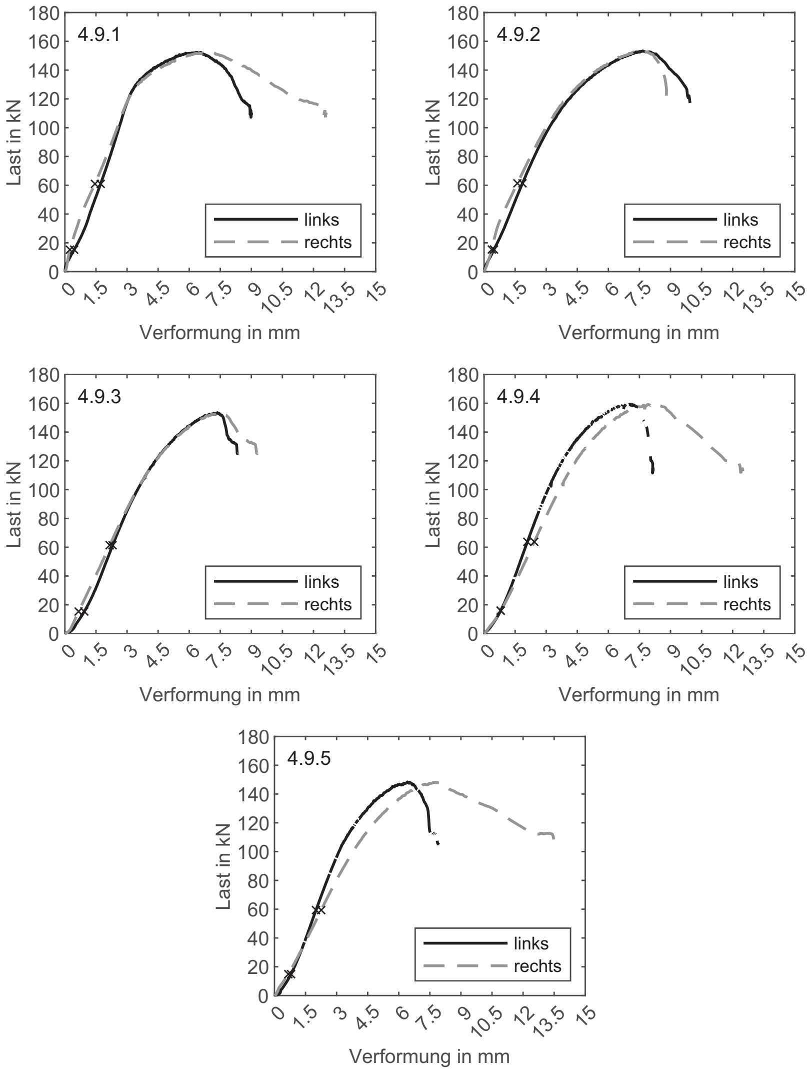


Bild A.16: Last-Verschiebungskurven Reihe 4.9 (Pyramiden 0,5 mm).

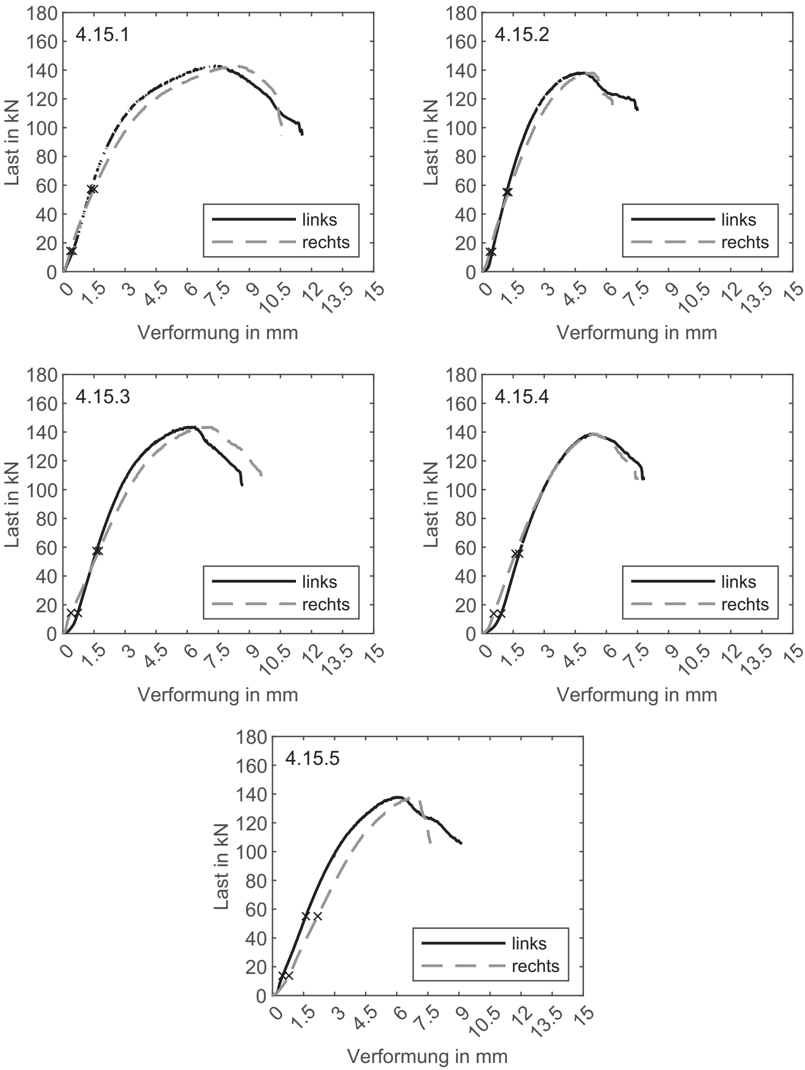


Bild A.17: Last-Verschiebungskurven Reihe 4.15 (geprägt).

Tabelle A.45: Einzelergebnisse Reihe 5: Versuche mit 15 Schrauben 6x200.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Geprägt					
5.15.1	198	11,1	11,9	44,1	39,4
5.15.2	176	13,3	13,3	36,8	35,5
5.15.3	181	10,3	10,0	33,9	34,8
MIN	176	10,3	10,0	33,9	34,8
MAX	198	13,3	13,3	44,1	39,4
MEAN	185	11,5	11,8	38,3	36,6
SD	11,4	1,55	1,63	5,29	2,45
COV	6%	13%	14%	14%	7%

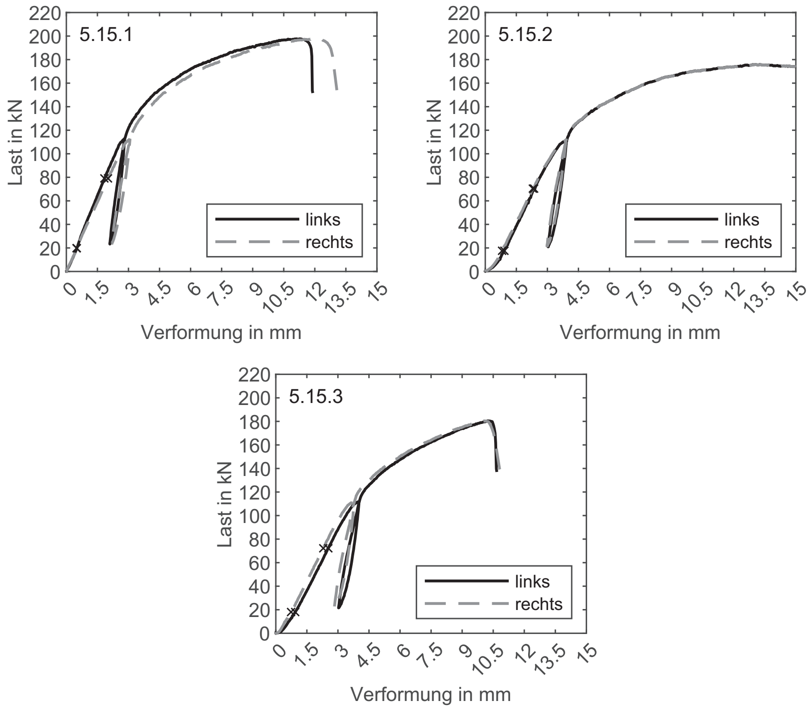


Bild A.18: Last-Verschiebungskurven Reihe 5.15 (geprägt).

Versuche mit Verbinderprototypen

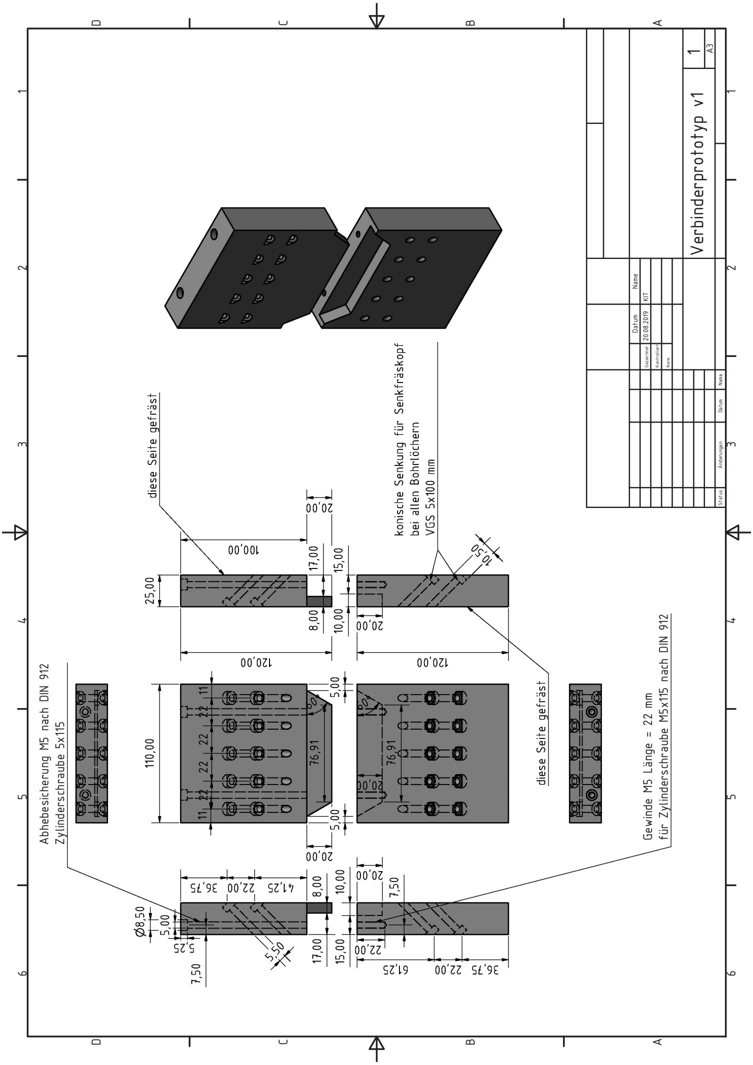


Bild A.19: Detailzeichnung Verbinderprototyp v1.

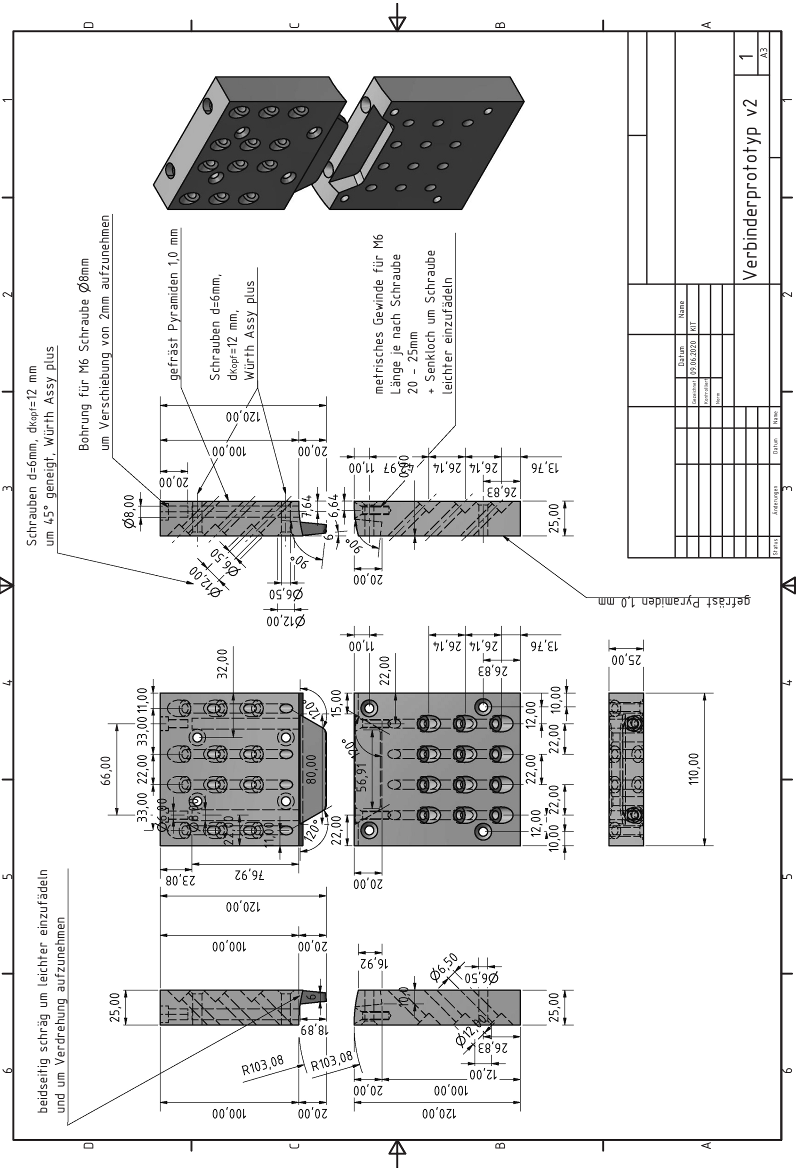


Bild A.20: Detailzeichnung Verbinderprototyp v2.

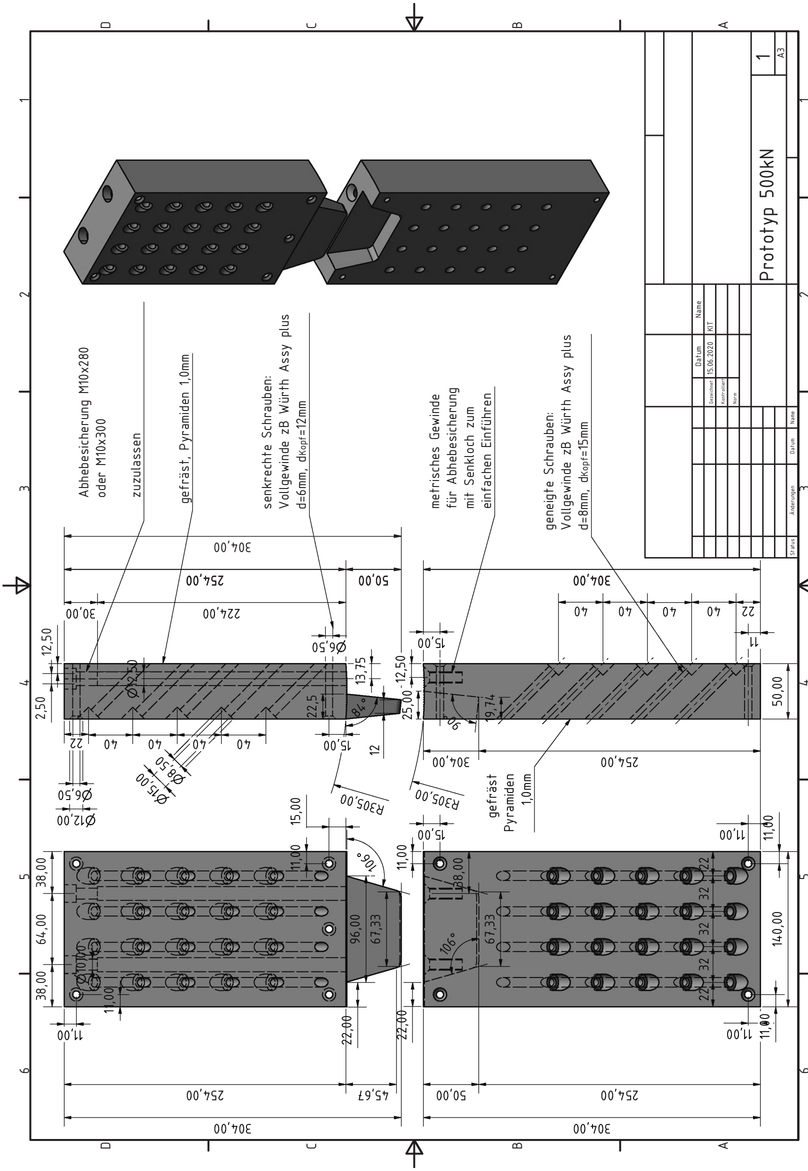
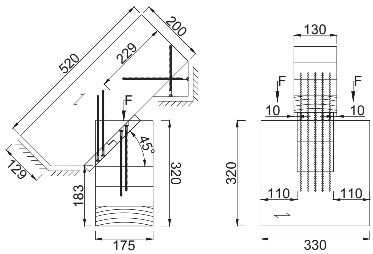
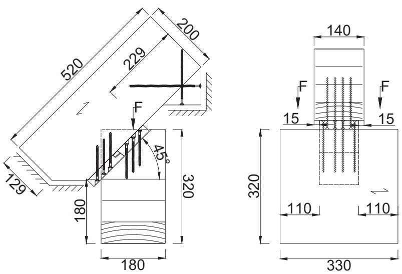


Bild A.21: Detailzeichnung Schwerlast-Verbinderprototyp.

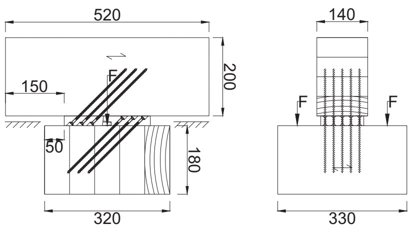
Belastungsrichtung F_1



Verbinderprototyp v1



Verbinderprototyp v2 (Lasteinleitung 45° zur Verbinderebene)



Verbinderprototyp v2 (Lasteinleitung 90° zur Verbinderebene)

Bild A.22: Prüfkörper für Belastungsrichtung F_1.

Tabelle A.46: Einzelergebnisse Verbinderprototyp v1 Belastungsrichtung F_1.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
ohne Abhebesicherung					
F1.1-ohne	6,79	2,10	2,19	3,65	3,59
F1.2-ohne	7,22	2,98	3,41	4,97	3,31
F1.3-ohne	7,52	2,79	2,75	3,02	2,76
F1.4-ohne [1)]	5,69	-	-	-	-
F1.5-ohne	7,31	1,81	1,01	3,92	7,74
F1.6-ohne	6,19	1,47	1,69	3,98	3,47
F1.7-ohne	6,37	1,57	1,62	3,93	3,66
F1.8-ohne	6,36	2,39	1,77	2,62	2,85
MIN	5,69	1,47	1,01	2,62	2,76
MAX	7,52	2,98	3,41	4,97	7,74
MEAN	6,68	2,16	2,06	3,73	3,91
SD	0,64	0,59	0,80	0,76	1,72
COV	10%	27%	39%	20%	44%
mit Abhebesicherung					
F1.1-mit	11,6	2,61	2,74	7,06	7,40
F1.2-mit	11,1	3,94	2,52	3,35	4,00
MIN	11,1	2,61	2,52	3,35	4,00
MAX	11,6	3,94	2,74	7,06	7,40
MEAN	11,4	3,27	2,63	5,20	5,70
SD	0,40	0,94	0,15	2,63	2,40
COV	3%	29%	6%	50%	42%

[1)] Fehler bei der Wegmessung

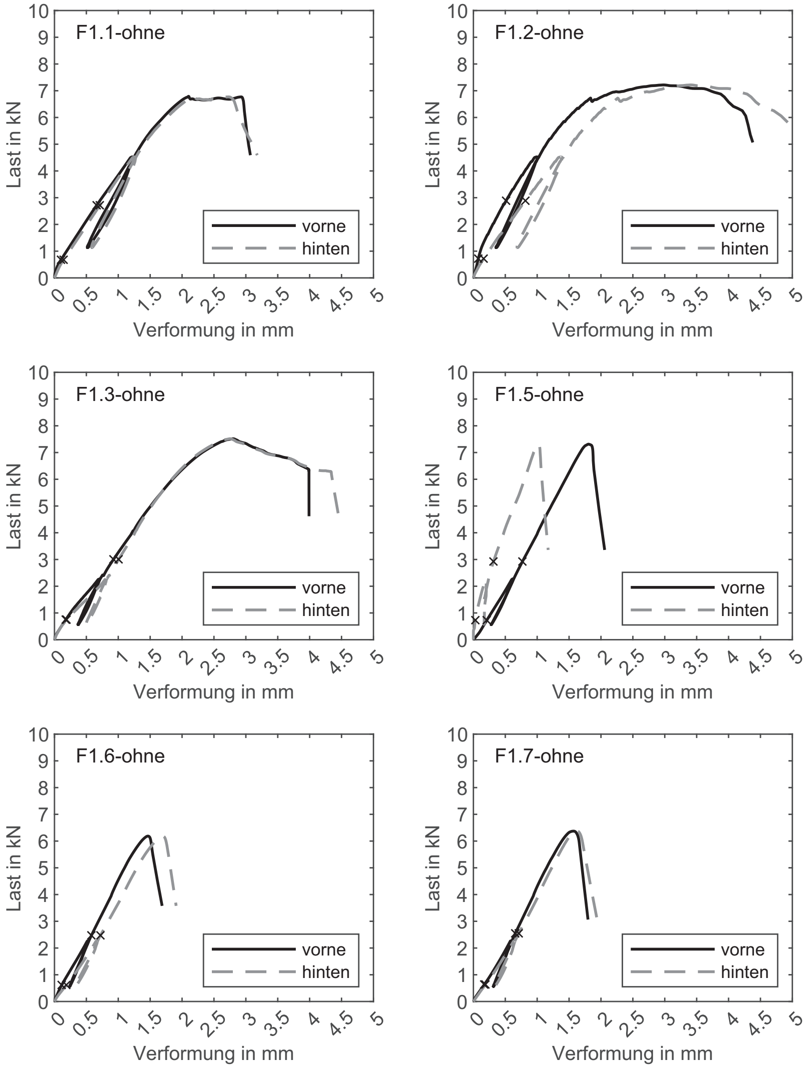


Bild A.23: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v1 Belastungsrichtung F_1 (ohne Abhebesicherung). Versuche 1–7.

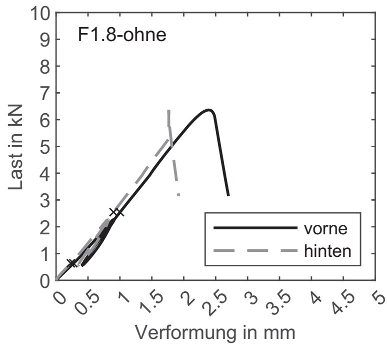


Bild A.24: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v1 Belastungsrichtung F_1 (ohne Abhebesicherung). Versuch 8.

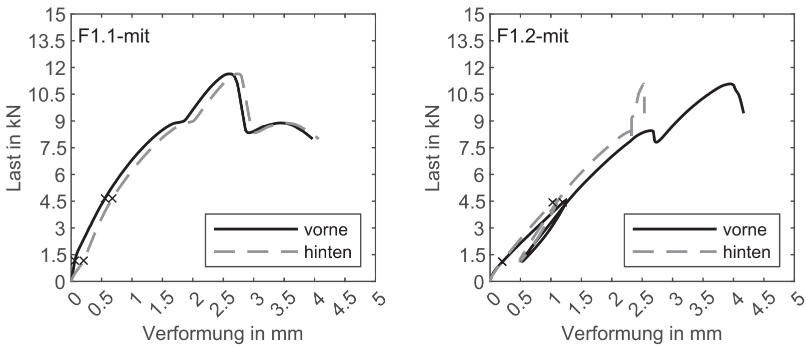


Bild A.25: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v1 Belastungsrichtung F_1 (mit Abhebesicherung).

Tabelle A.47: Einzelergebnisse Verbinderprototyp v2 Belastungsrichtung F_1.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Lasteinleitung 45°					
F1.1-45°	19,5	2,85	2,48	7,14	6,25
F1.2-45°	18,9	2,81	2,53	6,97	8,60
F1.3-45°	19,9	2,73	2,48	11,0	11,8
MIN	18,9	2,73	2,48	6,97	6,25
MAX	19,9	2,85	2,53	11,0	11,8
MEAN	19,4	2,80	2,50	8,37	8,87
SD	0,54	0,06	0,02	2,28	2,77
COV	3%	2%	1%	27%	31%
Lasteinleitung 90°					
F1.1-90°	16,6	4,78	4,81	6,30	5,37
F1.2-90°	15,4	3,41	3,15	5,21	5,54
F1.3-90°	16,0	4,63	4,65	8,52	7,89
MIN	15,4	3,41	3,15	5,21	5,37
MAX	16,6	4,78	4,81	8,52	7,89
MEAN	16,0	4,27	4,20	6,67	6,27
SD	0,61	0,75	0,92	1,69	1,41
COV	4%	18%	22%	25%	22%

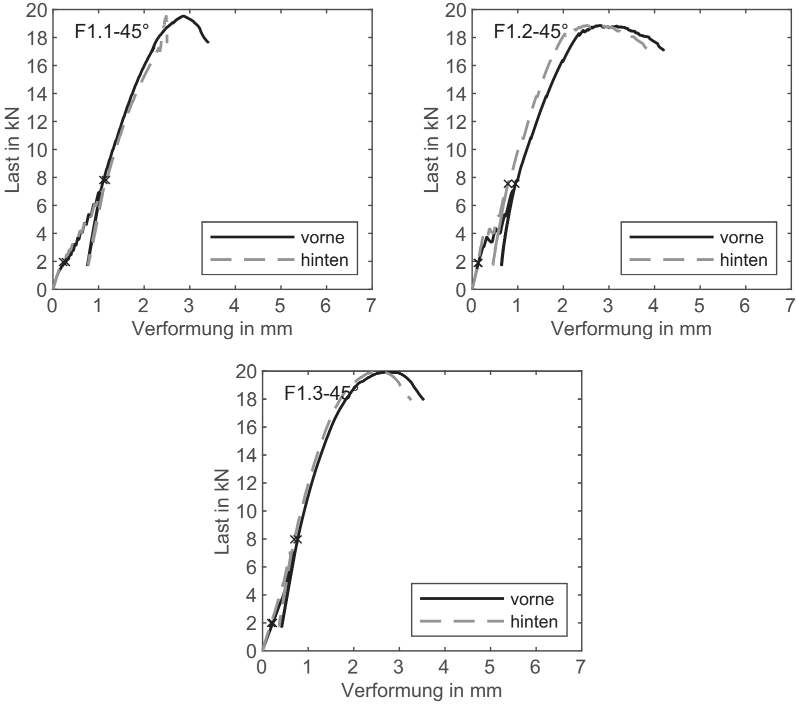


Bild A.26: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v2 Belastungsrichtung F_1 (Lasteinleitung 45°).

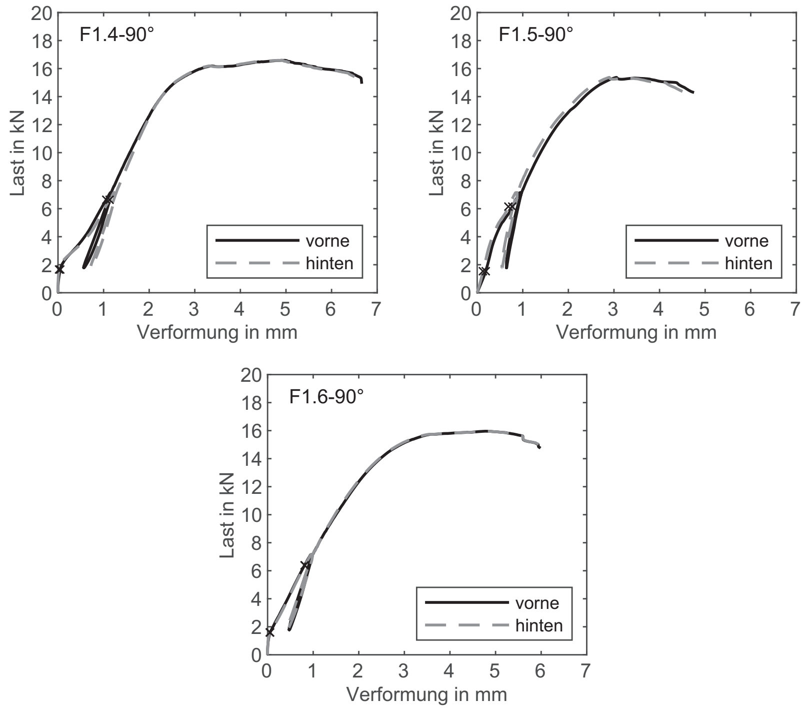
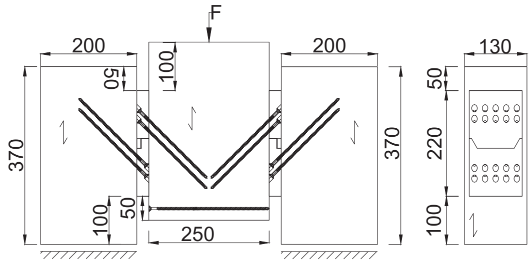
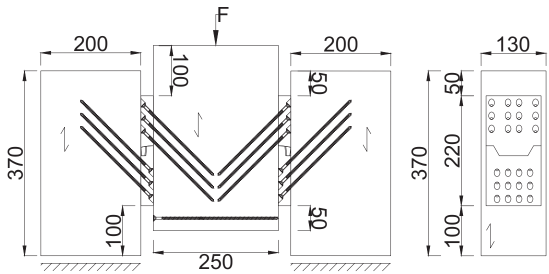


Bild A.27: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v2 Belastungsrichtung F_1 (Lasteinleitung 90°).

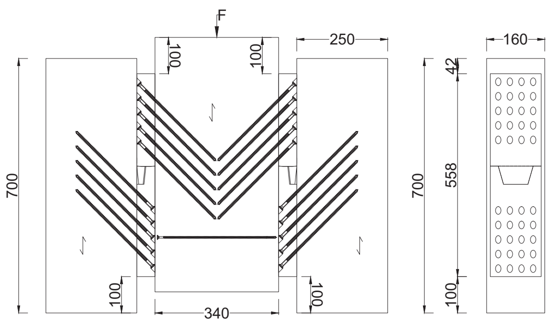
Belastungsrichtung F_2



Verbinderprototyp v1



Verbinderprototyp v2



Schwerlast-Verbinderprototyp

Bild A.28: Prüfkörper für Belastungsrichtung F_2.

Tabelle A.48: Einzelergebnisse Reihe 6: Verbinderprototyp v1 Belastungsrichtung F_2.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Prototyp v1					
6.9.1	156	10,5	11,1	23,0	21,1
6.9.2	154	12,8	-	28,3	-
6.9.3	146	13,6	14,0	26,8	24,4
6.9.4	149	13,3	-	27,8	-
6.9.5	153	11,6	11,8	28,0	27,5
6.9.10	142	14,8	15,1	28,3	28,1
6.9.11	148	15,0	15,7	27,2	24,0
6.9.12	150	14,5	15,3	27,7	24,8
6.9.13	158	10,4	10,6	16,3	16,2
MIN	142	10	11	16,3	16,2
MAX	158	15	16	28,3	28,1
MEAN	151	13	13	25,9	23,7
SD	5,09	1,74	2,18	3,98	4,07
COV	3%	13%	16%	15%	17%

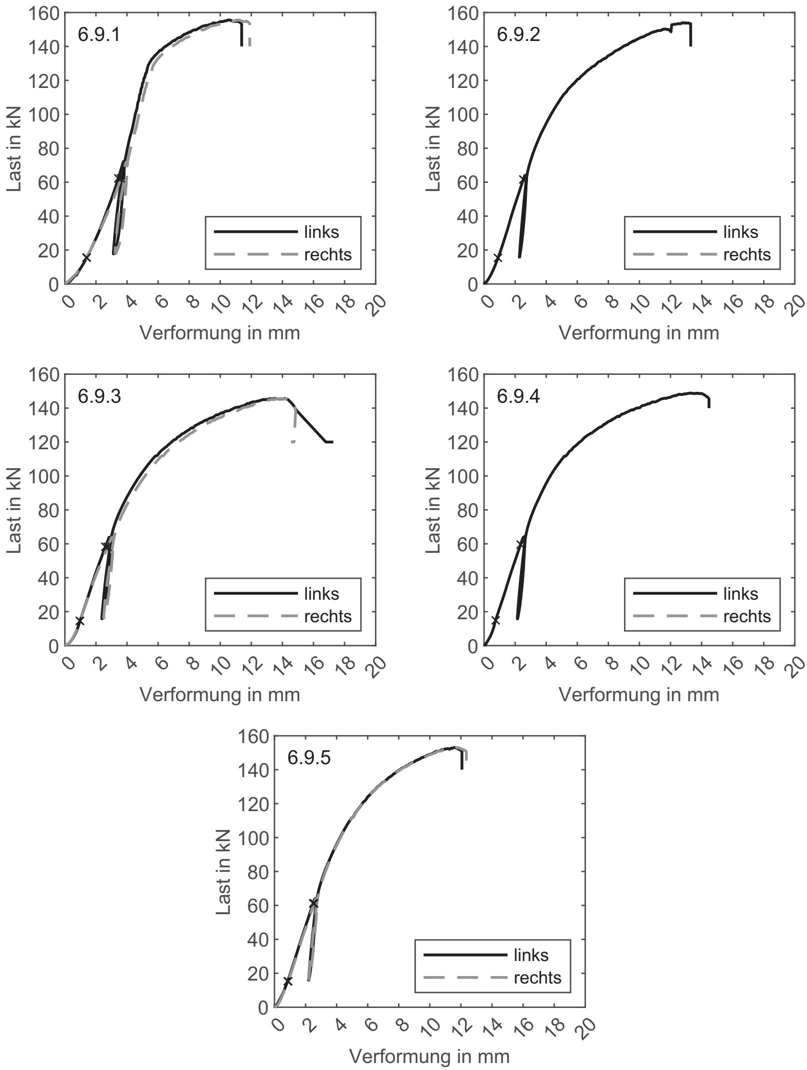


Bild A.29: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v1 (Pyramidenmuster 0,5 mm). Versuche 1–5.

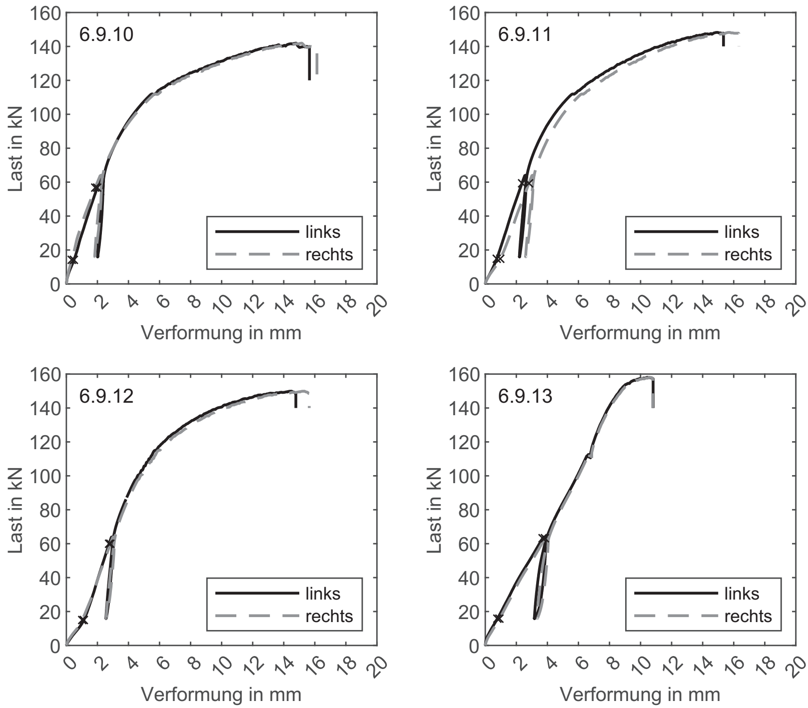


Bild A.30: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v1 (Pyramidenmuster 0,5 mm). Versuche 10–13.

Tabelle A.49: Einzelergebnisse Reihe 6: Verbinderprototyp v2 Belastungsrichtung F_2.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Prototyp v2					
6.10.1 [1)]	119	4,38	4,55	51,6	47,8
6.10.2 [2)]	155	12,4	11,6	30,7	34,7
6.10.3 [2)]	157	13,5	13,9	28,8	27,1
6.10.4	179	10,8	10,5	29,9	34,2
6.10.5	167	8,79	7,74	33,6	35,6
6.10.6 [3)]	192	8,84	9,30	60,0	62,0
6.10.7 [3)]	180	7,98	7,53	55,9	76,0
MIN	119	4,38	4,55	28,8	27,1
MAX	192	13,5	13,9	60,0	76,0
MEAN	164	9,53	9,31	41,5	45,3
SD	24	3,04	3,06	13,7	17,7
COV	15%	32%	33%	33%	39%

[1)] Fehler im Versuchsablauf

[2)] Querdruckversagen unter der Verbinderplatte

[3)] Versuchskörper aus BSP

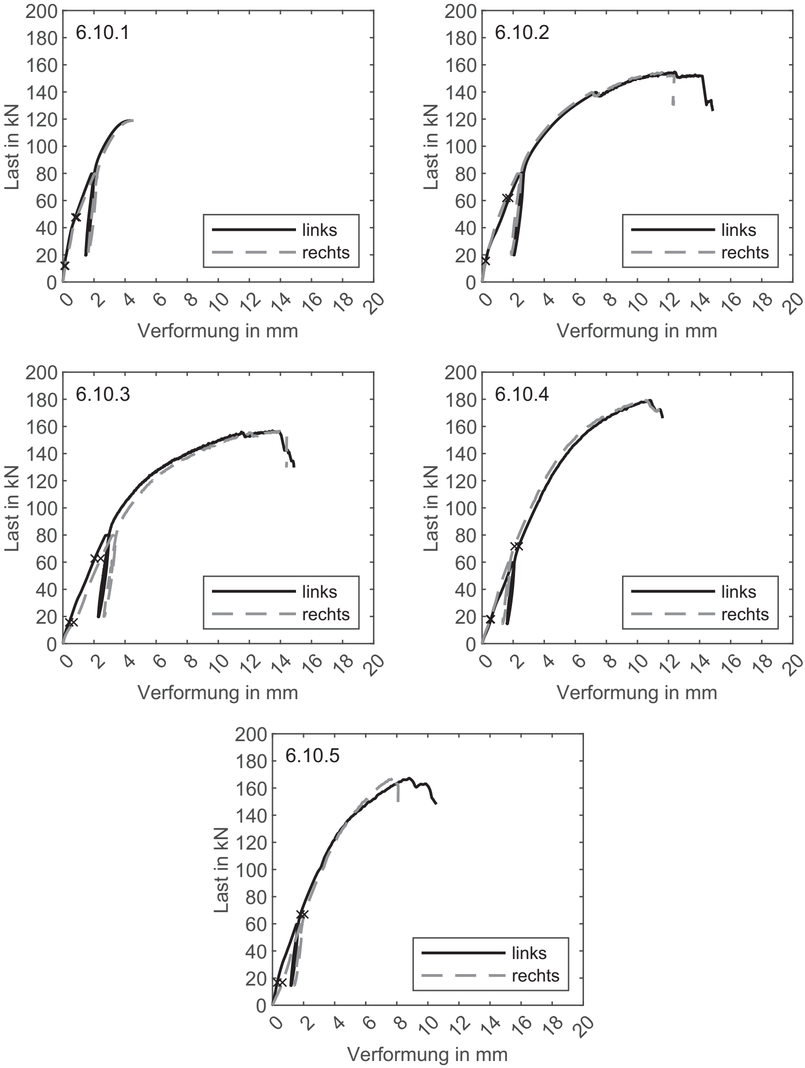


Bild A.31: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v2 (Pyramidenmuster 1,0 mm) mit Versuchskörper aus BSH.

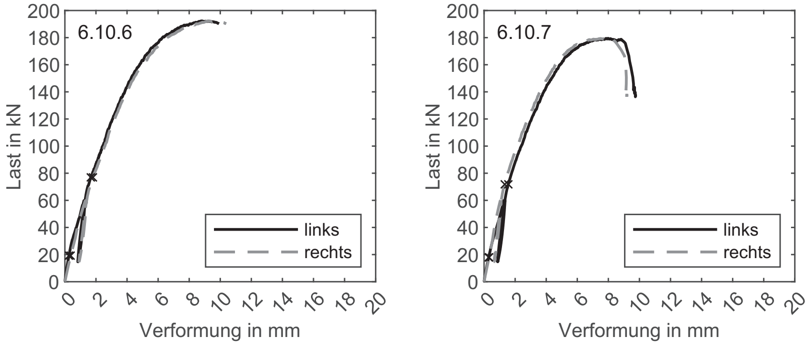


Bild A.32: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v2 (Pyramidenmuster 1,0 mm) mit Versuchskörper aus BSP.

Tabelle A.50: Einzelergebnisse Reihe 7: Verbinderprototyp 500kN Belastungsrichtung F_2.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Prototyp 500 kN					
7.10.1	491	15,5	15,7	85,4	84,6
7.10.2	499	17,0	16,6	78,1	74,3
7.10.3	499	16,8	16,8	79,8	83,0
7.10.4 [1)]	443	14,0	14,3	81,5	82,6
7.10.5 [2)]	503	9,58	10,1	107	102
MIN	443	9,58	10,1	78,1	74,3
MAX	503	17,0	16,8	107	102
MEAN	487	14,6	14,7	86,4	85,3
SD	25	3,03	2,76	11,9	10,2
COV	5%	21%	19%	14%	12%

[1)] Querdruckversagen unter der Verbinderplatte
[2)] Versuchskörper aus BSP

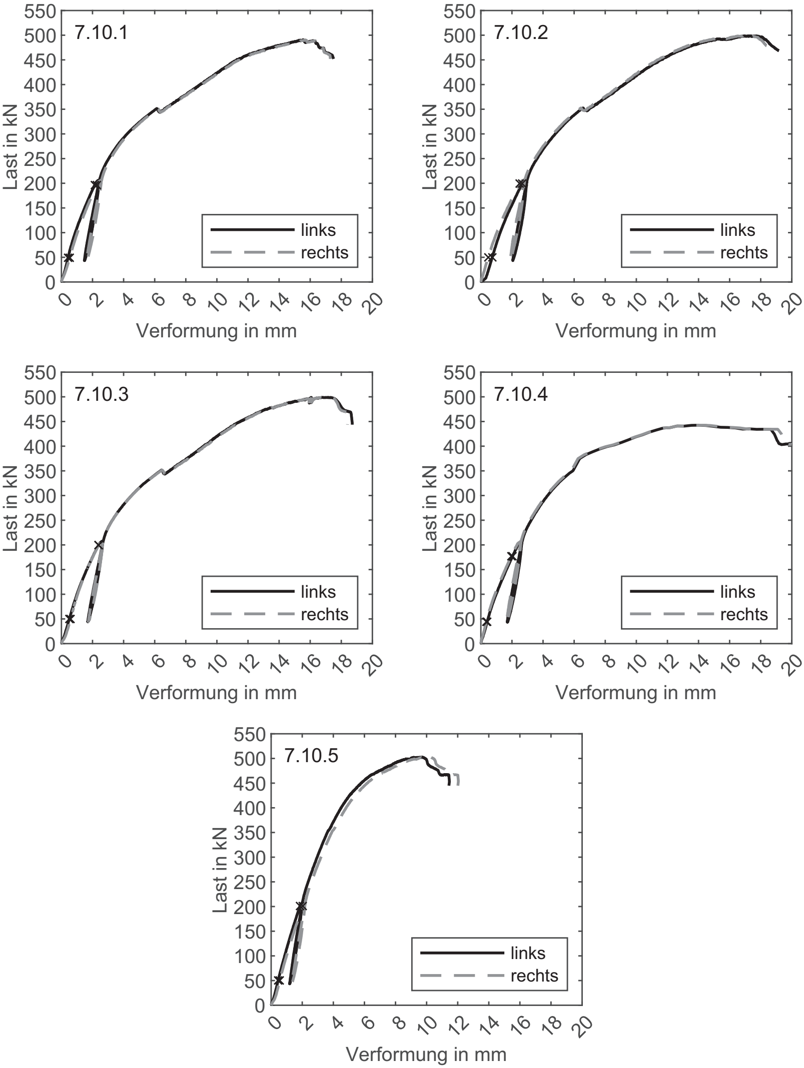
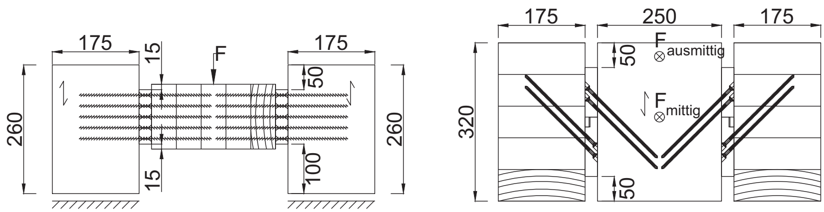
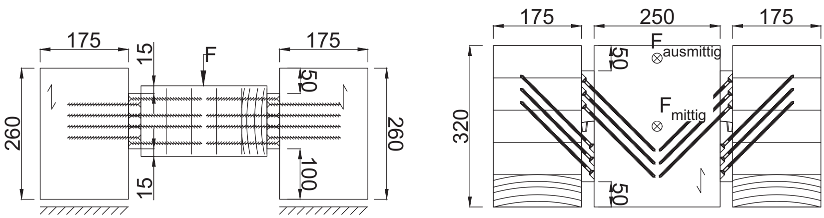


Bild A.33: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp 500 kN (Pyramidenmuster 1,0 mm).

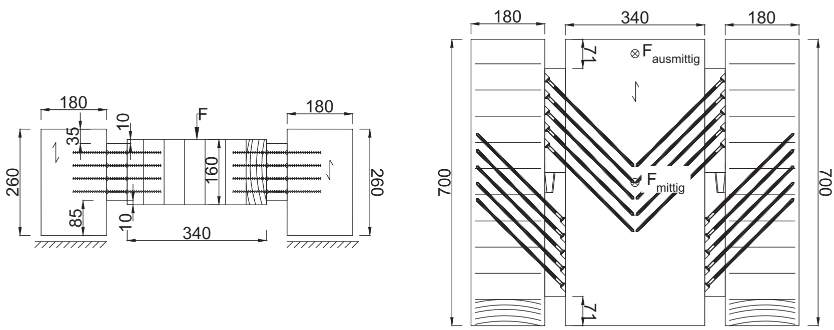
Belastungsrichtung F_{45}



Verbinderprototyp v1



Verbinderprototyp v2



Schwerlast-Verbinderprototyp

Bild A.34: Prüfkörper für Belastungsrichtung F_{45}.

Tabelle A.51: Einzelergebnisse Verbinderprototyp v1 Belastungsrichtung F_{45}.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,Mi}$ mm	$v_{max,Ok}$ mm	$k_{s,Mi}$ kN/mm	$k_{s,Ok}$ kN/mm
Belastung mittig					
F45.1-mittig	19,2	11,8	9,82	2,57	2,65
F45.2-mittig	19,4	9,69	7,87	2,62	2,61
F45.3-mittig	20,7	10,6	10,2	2,95	2,51
F45.4-mittig	24,5	12,6	14,7	3,54	2,44
F45.5-mittig	20,0	11,0	11,4	4,03	2,71
MIN	19,2	9,69	7,87	2,57	2,44
MAX	24,5	12,6	14,7	4,03	2,71
MEAN	20,8	11,1	10,8	3,14	2,58
SD	2,18	1,11	2,54	0,63	0,11
COV	10%	10%	24%	20%	4%
Belastung ausmittig					
F45.1-ausmittig	7,70	4,10	15,9	2,04	0,73
F45.2-ausmittig	9,49	7,40	19,4	1,95	0,75
F45.3-ausmittig	8,48	7,24	19,4	2,03	0,59
F45.4-ausmittig	8,62	7,52	18,8	2,13	0,70
F45.5-ausmittig	6,42	4,07	12,5	1,74	0,58
MIN	6,42	4,07	12,5	1,74	0,58
MAX	9,49	7,52	19,4	2,13	0,75
MEAN	8,14	6,07	17,2	1,98	0,67
SD	1,15	1,81	3,00	0,15	0,08
COV	14%	30%	17%	7%	12%

Mi = Mitte, Verformung gemessen in der Mitte der Verbinder

Ok = Oberkante, Verformung gemessen an der Oberkante der Verbinder

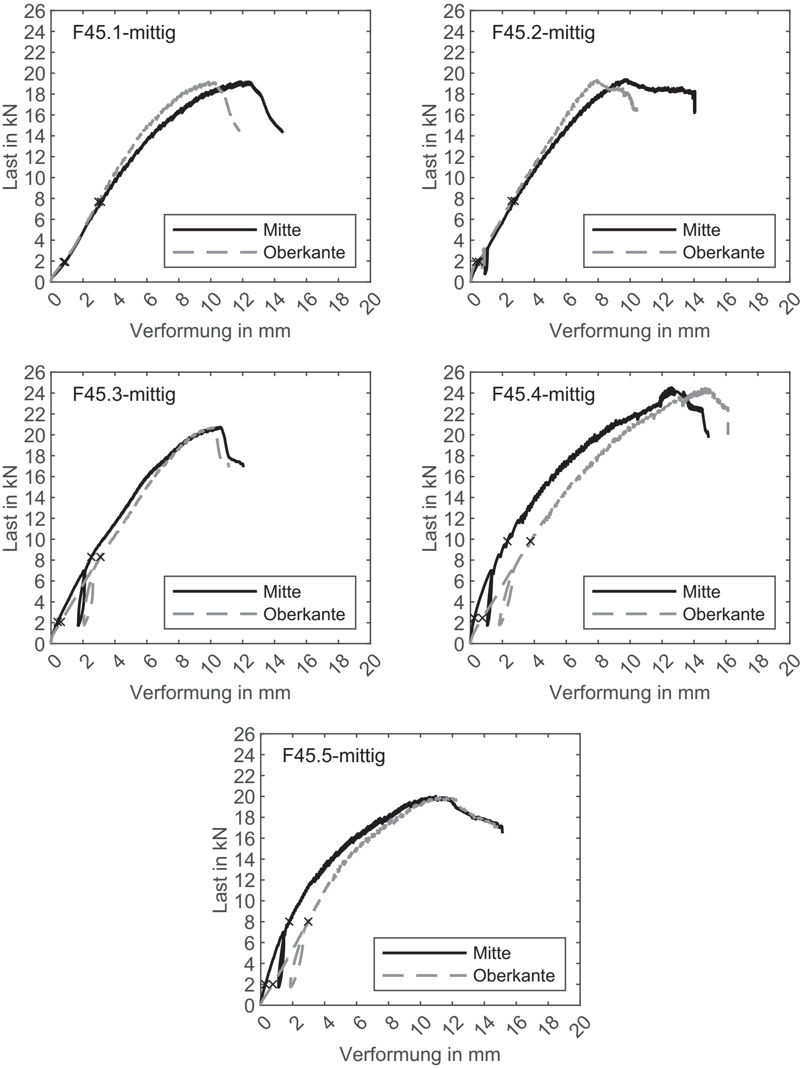


Bild A.35: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v1 Belastungsrichtung F_{45} (Belastung mittig).

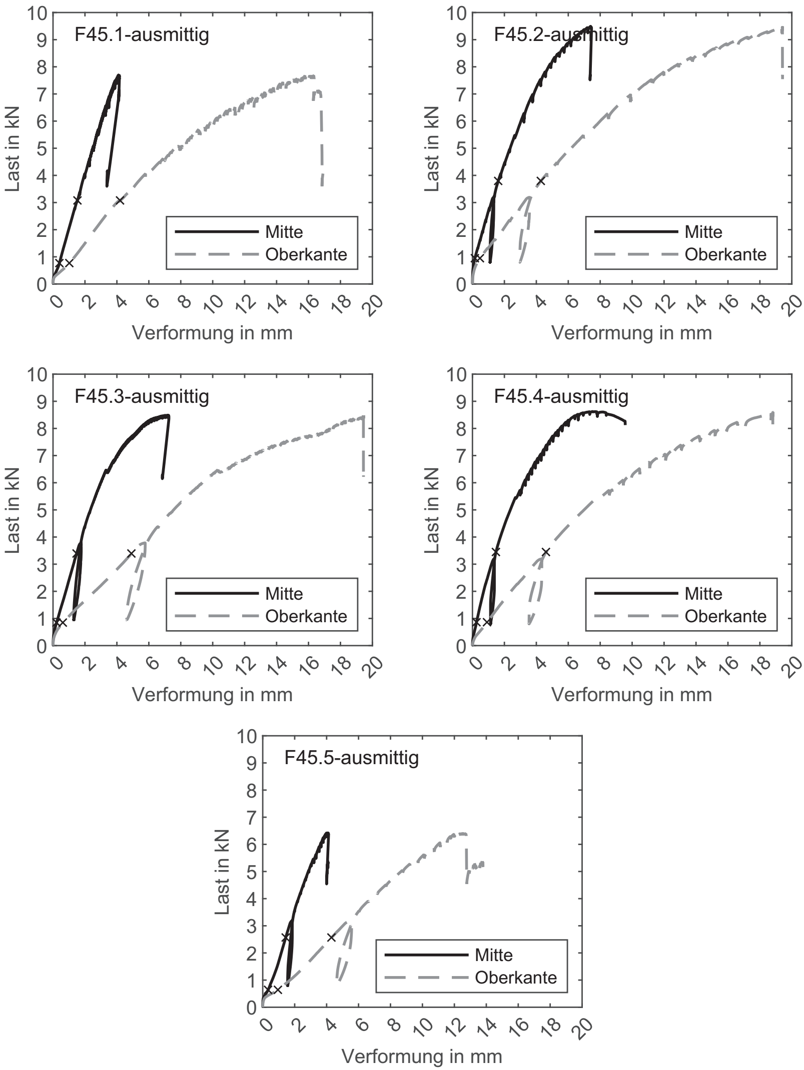


Bild A.36: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v1 Belastungsrichtung F_{45} (Belastung ausmittig).

Tabelle A.52: Einzelergebnisse Verbinderprototyp v2 Belastungsrichtung F_{45}.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,Mi}$ mm	$v_{max,Ok}$ mm	$k_{s,Mi}$ kN/mm	$k_{s,Ok}$ kN/mm
Belastung mittig					
F45.1-mittig	29,7	6,08	8,22	11,4	8,94
F45.2-mittig	28,3	5,73	7,65	10,6	8,63
F45.3-mittig	25,6	3,77	5,16	11,9	9,54
F45.4-mittig	27,0	1,11	5,58	88,5	8,55
F45.5-mittig	27,5	3,33	5,34	14,2	9,87
F45.6-mittig	29,4	4,65	6,79	13,6	9,46
MIN	25,6	1,11	5,16	10,6	8,55
MAX	29,7	6,08	8,22	88,5	9,87
MEAN	27,9	4,11	6,46	25,1	9,17
SD	1,54	1,82	1,29	31,1	0,54
COV	6%	44%	20%	124%	6%
Belastung ausmittig					
F45.4-ausmittig	7,68	0,75	5,73	36,7	2,47
F45.5-ausmittig	8,76	2,53	7,44	5,11	2,58
F45.6-ausmittig	8,51	2,24	6,07	4,49	2,20
MIN	7,68	0,75	5,73	4,49	2,20
MAX	8,76	2,53	7,44	36,7	2,58
MEAN	8,32	1,84	6,41	15,4	2,42
SD	0,56	0,96	0,90	18,4	0,20
COV	7%	52%	14%	119%	8%

Mi = Mitte, Verformung gemessen in der Mitte der Verbinder

Ok = Oberkante, Verformung gemessen an der Oberkante der Verbinder

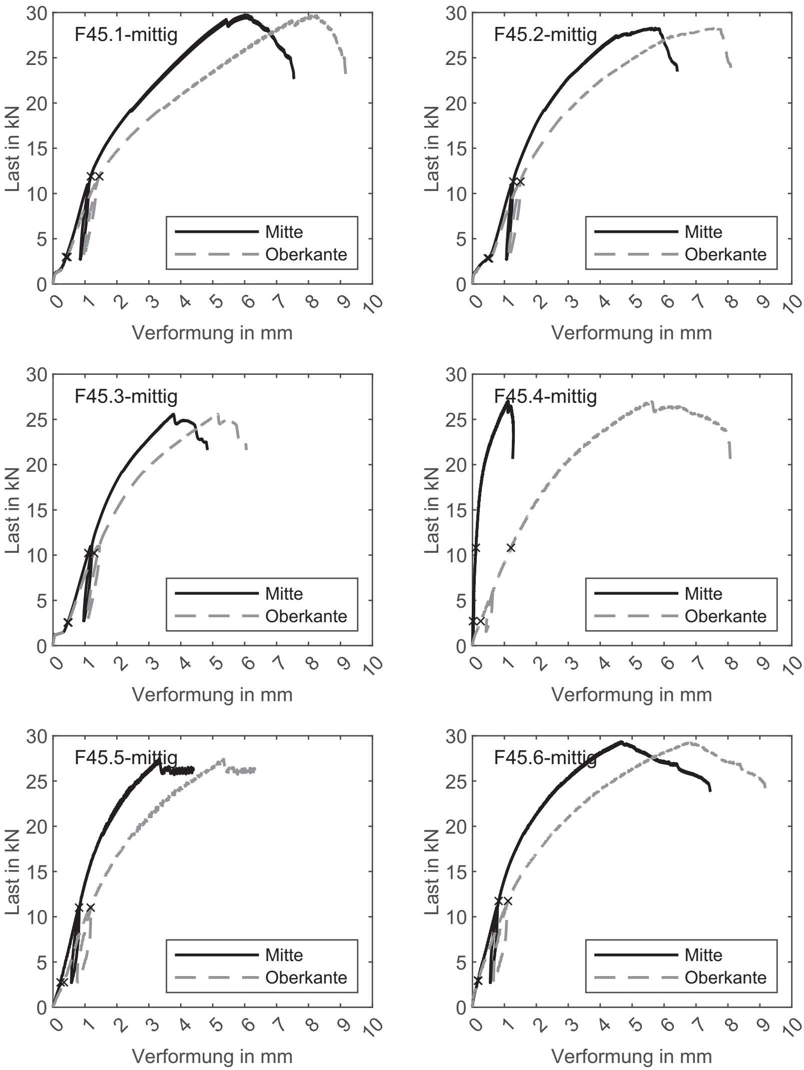


Bild A.37: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v2 Belastungsrichtung F_{45} (Belastung mittig).

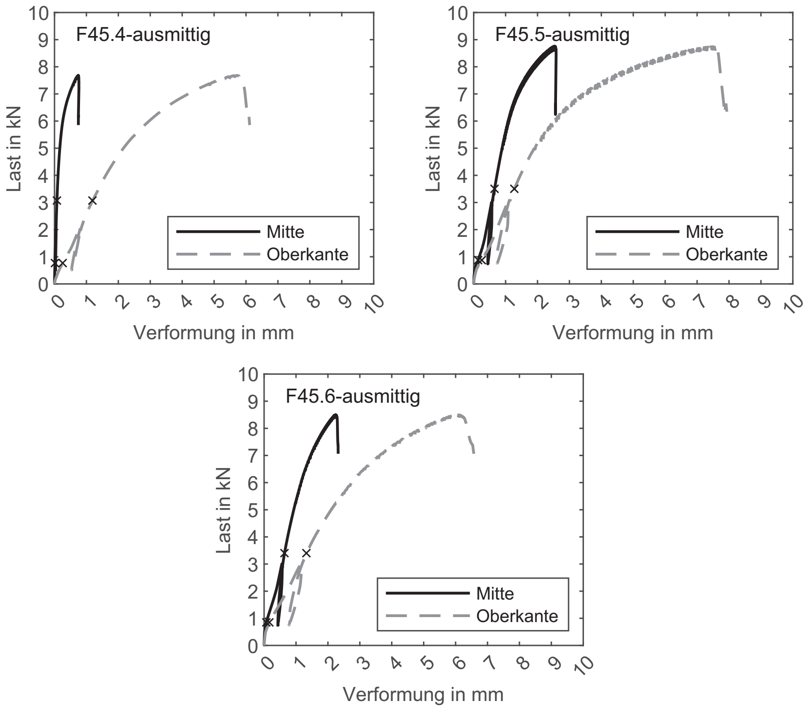


Bild A.38: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v2 Belastungsrichtung F_{45} (Belastung ausmittig).

Tabelle A.53: Einzelergebnisse Verbinderprototyp 500 kN Belastungsrichtung F_{45}.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,Mi}$ mm	$v_{max,Ok}$ mm	$k_{s,Mi}$ kN/mm	$k_{s,Ok}$ kN/mm
Belastung mittig					
F45.1-mittig	67,9	12,9	4,50	10,3	27,4
F45.2-mittig	80,5	22,0	7,82	7,94	21,7
F45.3-mittig	87,3	14,2	6,30	8,60	20,0
MIN	67,9	12,9	4,50	7,94	20,0
MAX	87,3	22,0	7,82	10,3	27,4
MEAN	78,5	16,3	6,21	8,93	23,1
SD	9,85	4,92	1,66	1,20	3,90
COV	13%	30%	27%	13%	17%
Belastung ausmittig					
F45.1-ausmittig	10,0	6,80	1,06	2,41	14,7
F45.2-ausmittig	9,72	7,66	1,26	2,51	13,4
F45.3-ausmittig	9,71	6,02	1,43	2,99	20,6
MIN	9,71	6,02	1,06	2,41	13,4
MAX	10,0	7,66	1,43	2,99	20,6
MEAN	9,82	6,83	1,25	2,63	16,3
SD	0,18	0,82	0,19	0,31	3,83
COV	2%	12%	15%	12%	24%

Mi = Mitte, Verformung gemessen in der Mitte der Verbinder

Ok = Oberkante, Verformung gemessen an der Oberkante der Verbinder

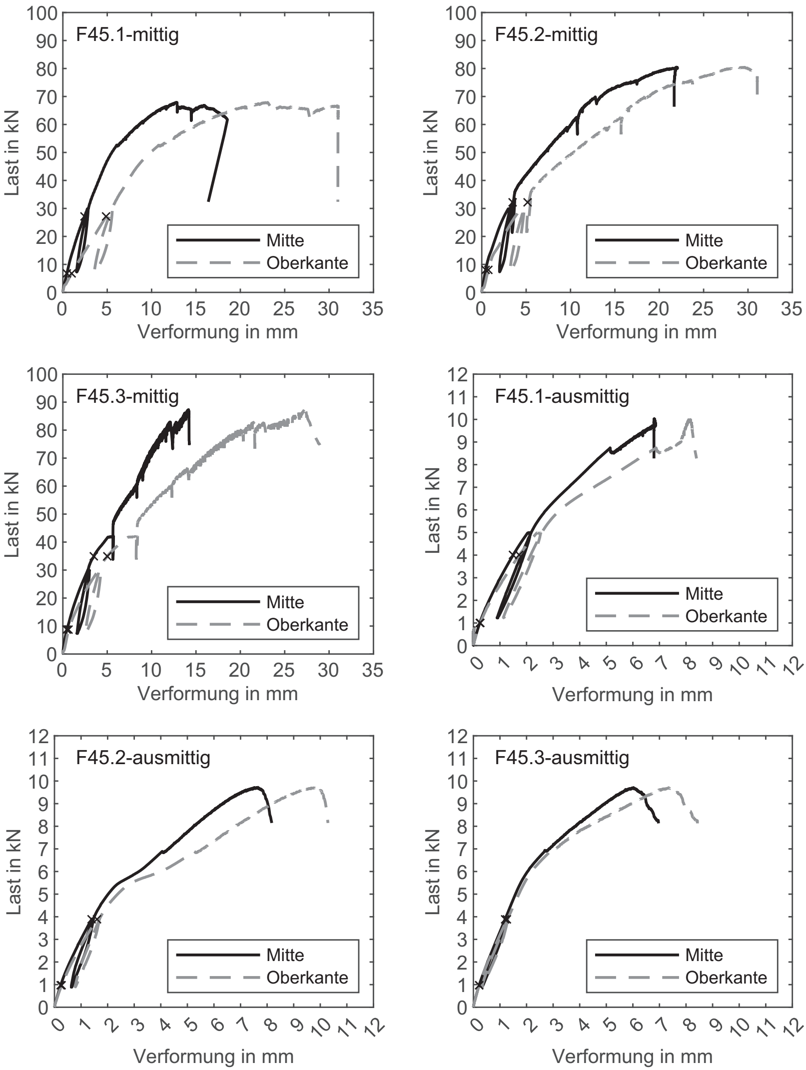
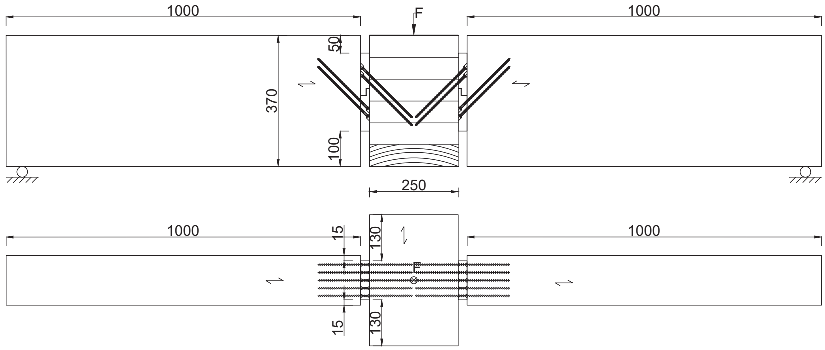
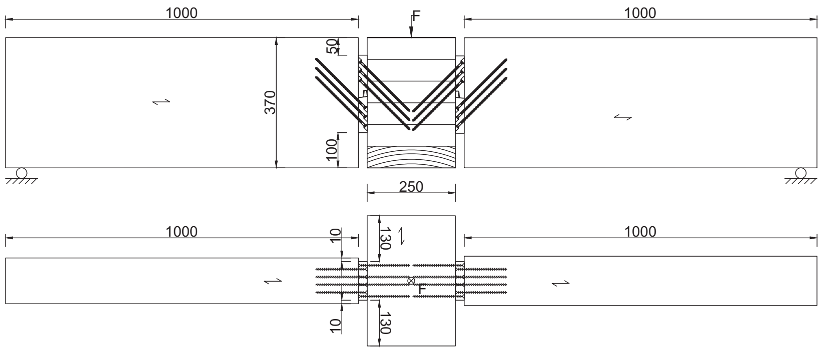


Bild A.39: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp 500 kN Belastungsrichtung F_{45} (Belastung mittig und ausmittig).

Belastungsrichtung M_2



Verbinderprototyp v1



Verbinderprototyp v2

Bild A.40: Prüfkörper für Belastungsrichtung M_2.

Tabelle A.54: Einzelergebnisse Verbinderprototyp v1 Momentenbeanspruchung M_2.

Versuch	M_{max} kNm	$\varphi_{max,li}$ Grad	$\varphi_{max,re}$ Grad	$k_{s,li}$ kNm/rad	$k_{s,re}$ kNm/rad
Prototyp v1					
M2.1	1,00	2,97	2,85	18,5	24,6
M2.2	1,04	3,01	3,46	20,7	18,0
MIN	1,00	2,97	2,85	18,5	18,0
MAX	1,04	3,01	3,46	20,7	24,6
MEAN	1,02	2,99	3,15	19,6	21,3
SD	0,03	0,03	0,44	1,59	4,63
COV	3%	1%	14%	8%	22%

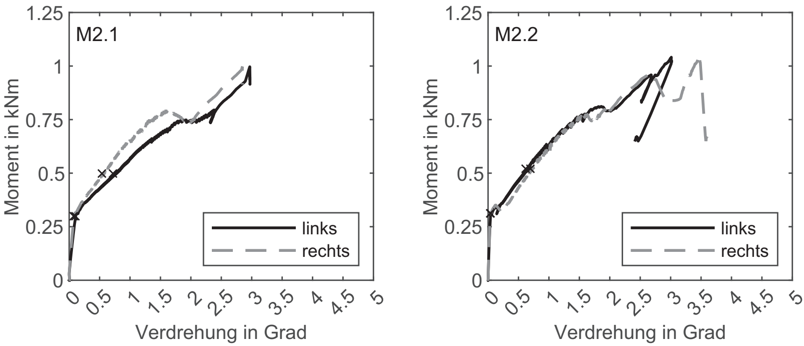


Bild A.41: Moment-Verdrehungskurven Verbinderprototyp v1 Momentenbeanspruchung M_2.

Tabelle A.55: Einzelergebnisse Verbinderprototyp v2 Momentenbeanspruchung M_2.

Versuch	M_{max} kNm	$\varphi_{max,li}$ Grad	$\varphi_{max,re}$ Grad	$k_{s,li}$ kNm/rad	$k_{s,re}$ kNm/rad
Prototyp v2					
M2.1	1,99	2,71	2,59	61,7	60,6
M2.2	2,05	2,51	2,82	59,2	60,2
M2.3	1,89	2,45	1,77	63,7	66,3
MIN	1,89	2,45	1,77	59,2	60,2
MAX	2,05	2,71	2,82	63,7	66,3
MEAN	1,98	2,56	2,39	61,5	62,4
SD	0,08	0,14	0,55	2,27	3,38
COV	4%	6%	23%	4%	5%

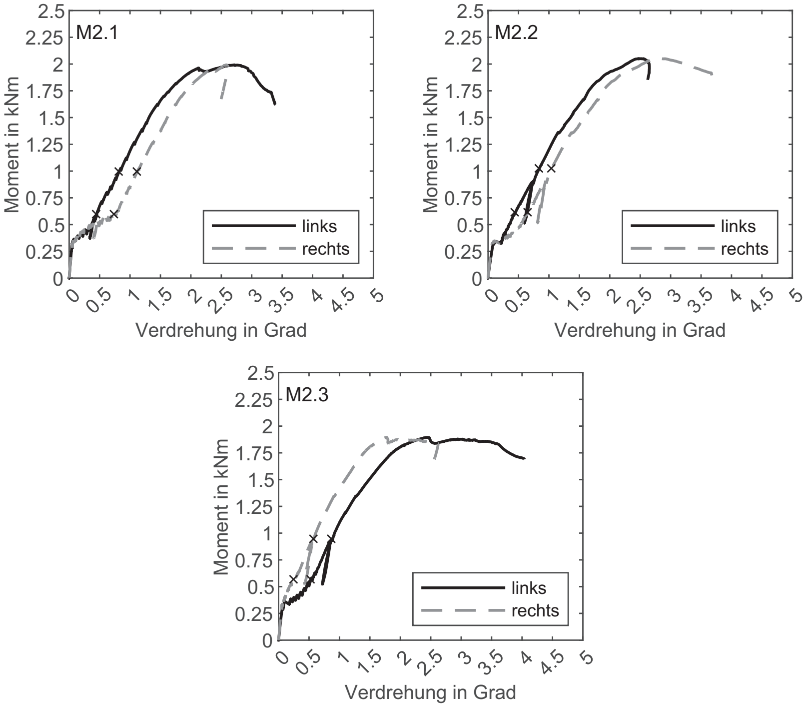
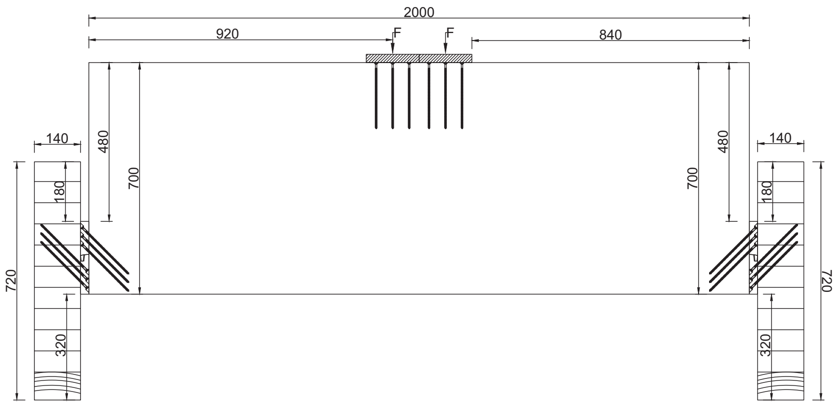


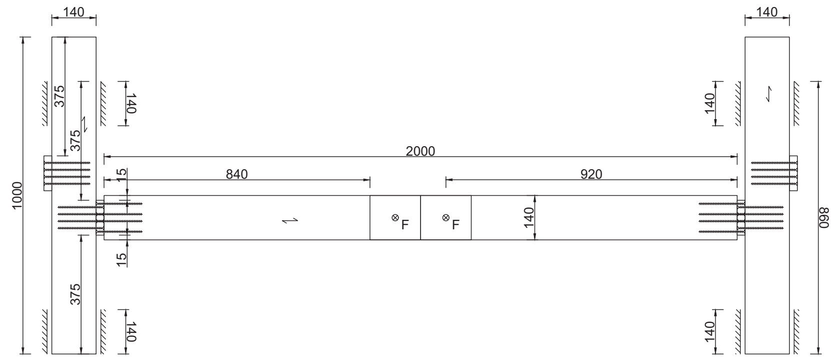
Bild A.42: Moment-Verdrehungskurven Verbinderprototyp v2 Momentenbeanspruchung M_2.

A.4 Haupt-Nebenträger-Systemversuche

Verbinderprototyp v2



Ansicht



Draufsicht

Bild A.43: Prüfkörper mit Verbinderprototyp v2 für Haupt-Nebenträger-Versuche.

Tabelle A.56: Einzelergebnisse HT-NT-Versuche mit Verbinderprototyp v2.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$\varphi_{max,li}$ Grad	$\varphi_{max,re}$ Grad	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Prototyp v2							
v2-HTNT-0 1)	89	3,30	3,44	0,15	0,21	29,4	26,3
v2-HTNT-1 2)	181	10,0	10,8	0,21	0,28	37,2	35,0
v2-HTNT-2	165	10,2	13,2	0,18	0,50	30,4	27,1
v2-HTNT-3	171	11,0	14,8	0,20	0,54	33,5	34,6
v2-HTNT-4	169	10,7	11,6	0,19	0,48	33,3	33,9
MIN	165	10,0	10,8	0,18	0,28	29,4	26,3
MAX	181	11,0	14,8	0,21	0,54	37,2	35,0
MEAN	172	10,5	12,6	0,20	0,45	32,8	31,4
SD	7,0	0,44	1,78	0,02	0,12	3,04	4,31
COV	4%	4%	14%	8%	26%	9%	14%

1) Fehler bei der Messdatenerfassung

2) Vorbelastet bis 89 kN

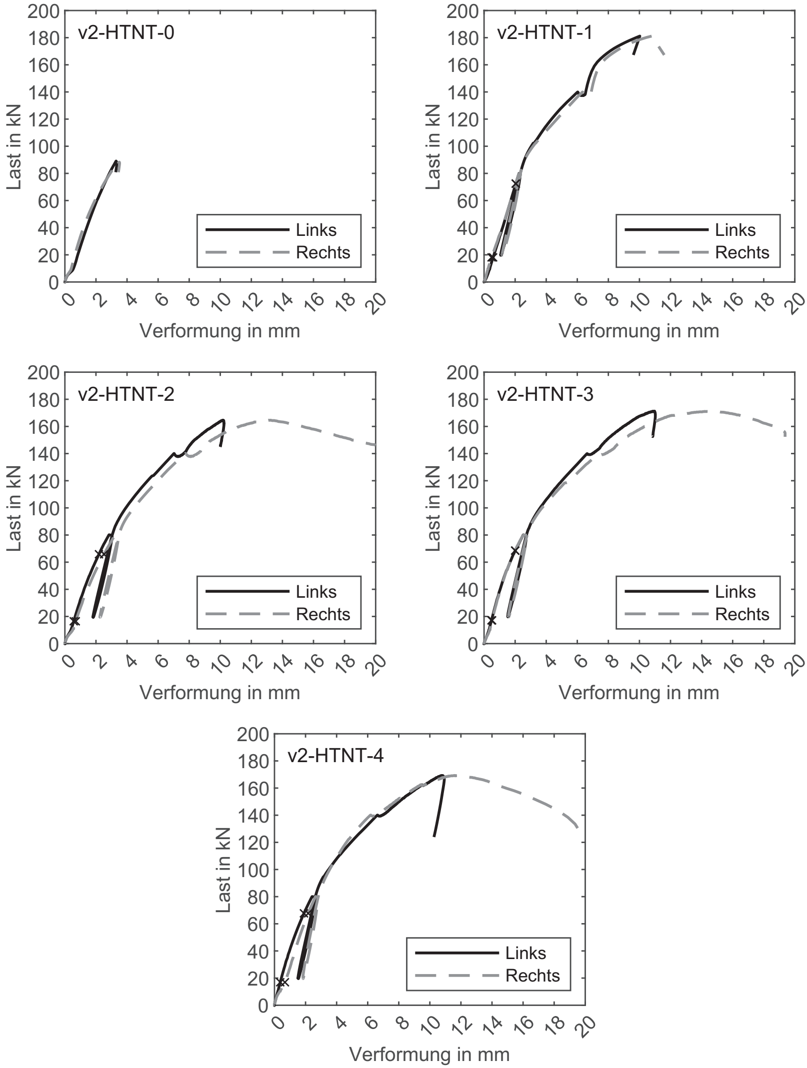
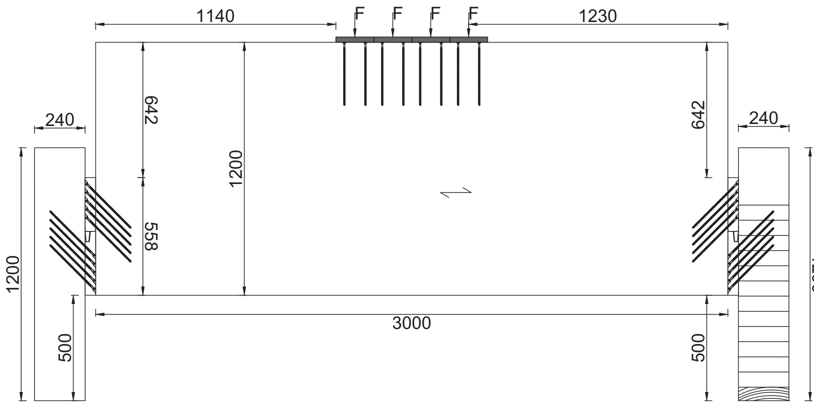
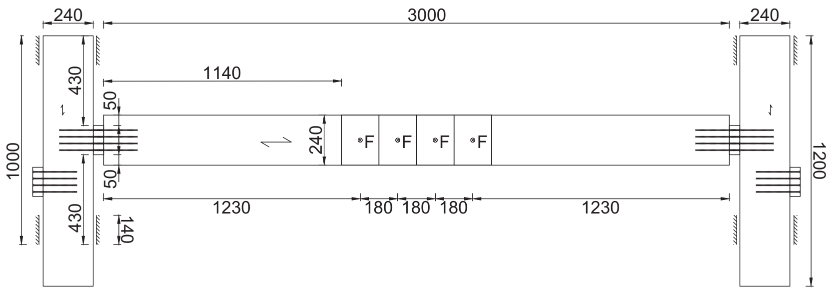


Bild A.44: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp v2 (HT-NT-Versuche).

Schwerlast-Verbinderprototyp



Ansicht



Draufsicht

Bild A.45: Prüfkörper mit Schwerlast-Verbinderprototyp für Haupt-Nebenträger-Versuche.

Tabelle A.57: Einzelergebnisse HT-NT-Versuche mit Schwerlast-Verbinderprototyp.

Versuch	F_{max} kN	$v_{max,li}$ mm	$v_{max,re}$ mm	$\varphi_{max,li}$ Grad	$\varphi_{max,re}$ Grad	$k_{s,li}$ kN/mm	$k_{s,re}$ kN/mm
Prototyp 500kN							
500kN-HTNT-1	393	11,8	14,3	0,48	0,41	74,0	68,1
500kN-HTNT-2	362	10,5	9,30	0,49	0,29	73,4	72,2
500kN-HTNT-3 [1)]	429	12,2	11,7	0,39	0,35	68,6	73,6
MIN	362	10,5	9,30	0,39	0,29	68,6	68,1
MAX	429	12,2	14,3	0,49	0,41	74,0	73,6
MEAN	394	11,5	11,8	0,45	0,35	72,0	71,3
SD	33	0,92	2,50	0,05	0,06	2,93	2,85
COV	8%	8%	21%	11%	17%	4%	4%

[1)] Zusätzliche Querzugverstärkung im Nebenträger

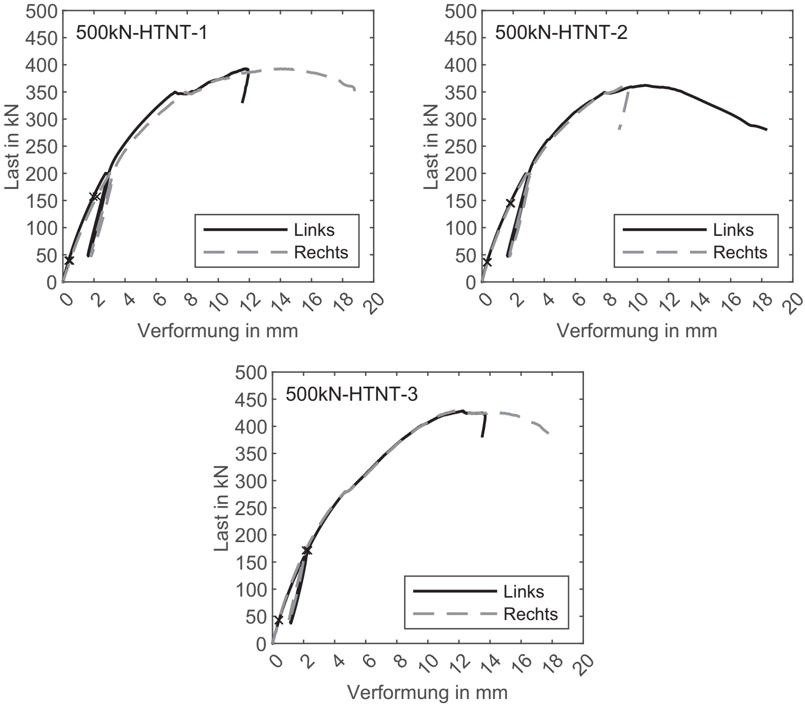


Bild A.46: Last-Verschiebungskurven Verbinderprototyp 500kN (HT-NT-Versuche).

A.5 Analytisches Rechenmodell

Tabelle A.58: Verhältnis von Normalkraft in der Schraube N zu Zugtragfähigkeit der Schraube F_{tens} für verschiedene Reibbeiwerte (Mittelwerte in kN).

		μ_{stat}		μ_{kin}		μ_{adj}	
		N	N/F_{tens}	N	N/F_{tens}	N	N/F_{tens}
R6	Prototyp v1 [1)]	12,1	0,85	14,6	1,03	13,8	0,97
		12,0	0,84	14,4	1,02	13,7	0,96
		11,3	0,80	13,6	0,96	13,0	0,91
		11,6	0,81	13,9	0,98	13,2	0,93
		11,9	0,84	14,3	1,01	13,6	0,96
		11,0	0,78	13,3	0,94	12,6	0,89
		11,5	0,81	13,9	0,98	13,2	0,93
		11,6	0,82	14,0	0,99	13,3	0,94
R6	Prototyp v2 [1)]	7,46	0,53	9,42	0,66	8,20	0,58
		9,70	0,68	12,2	0,86	10,7	0,75
		9,83	0,69	12,4	0,87	10,8	0,76
		11,2	0,79	14,2	1,00	12,4	0,87
		10,5	0,74	13,2	0,93	11,5	0,81
		12,1	0,85	15,2	1,07	13,3	0,93
		11,3	0,79	14,2	1,00	12,4	0,87
R7	Prototyp 500kN [2)]	18,5	0,77	23,3	0,97	22,0	0,91
		18,8	0,78	23,7	0,98	22,3	0,93
		18,8	0,78	23,7	0,98	22,3	0,93
		16,6	0,69	21,0	0,87	19,8	0,82
		18,9	0,78	23,9	0,99	22,5	0,93
MIN			0,53		0,66		0,58
MAX			0,85		1,07		0,97
MEAN			0,77		0,95		0,88

[1)] VGS d = 6 mm mit F_{tens} = 14,2 kN
[2)] VGS d = 8 mm mit F_{tens} = 24,1 kN

Tabelle A.59: Vergleich von Versuchsergebnissen mit rechnerischen Tragfähigkeiten für verschiedene Reibbeiwerte (Mittelwerte in kN).

			μ_{stat}		μ_{kin}		μ_{adj}		$0{,}9 \cdot F_{tens} + \mu_{adj}$	
		$F_{V,test}$	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.
R1	Pyramiden	55,7	54,5	1,02	43,2	1,29	54,5	1,02	53,6	1,04
	1,0 mm	48,3	52,3	0,92	41,4	1,17	52,3	0,92	53,6	0,90
		54,7	54,6	1,00	43,2	1,27	54,6	1,00	53,6	1,02
	Pyramiden	52,7	58,2	0,91	42,4	1,24	58,2	0,91	57,9	0,91
	1,5 mm	52,7	58,7	0,90	42,8	1,23	58,7	0,90	57,9	0,91
		55,0	59,0	0,93	43,0	1,28	59,0	0,93	57,9	0,95
	Kreisförmiges	50,0	44,7	1,12	37,4	1,34	44,7	1,12	50,8	0,98
	Muster	50,0	45,5	1,10	38,1	1,31	45,5	1,10	50,8	0,99
		49,7	45,9	1,08	38,4	1,29	45,9	1,08	50,8	0,98
R2	Pyramiden	47,8	54,7	0,87	43,3	1,10	46,0	1,04	45,1	1,06
	1,0 mm	48,9	57,3	0,86	45,0	1,09	47,8	1,02	45,1	1,09
		47,0	55,4	0,85	43,9	1,07	46,5	1,01	45,1	1,04
		46,0	43,4	1,06	43,0	1,07	45,6	1,01	44,9	1,02
		55,7	54,6	1,02	43,3	1,29	45,9	1,22	44,3	1,26
	Pyramiden	49,0	61,2	0,80	45,0	1,09	47,4	1,04	45,3	1,08
	1,5 mm	41,4	59,4	0,70	35,4	1,17	37,2	1,11	36,2	1,14
		54,4	59,0	0,92	43,9	1,24	46,2	1,18	45,3	1,20
		46,4	61,0	0,76	45,4	1,02	47,8	0,97	45,3	1,02

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.59:**

			μ_{stat}		μ_{kin}		μ_{adj}		$0{,}9 \cdot f_{tens} + \mu_{adj}$	
		$F_{V,test}$	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.
R3	Pyramiden	88,8	91,4	0,97	75,8	1,17	79,8	1,11	71,9	1,24
	0,5 mm	87,1	91,4	0,95	75,8	1,15	79,8	1,09	71,9	1,21
		84,1	91,4	0,92	75,8	1,11	79,8	1,05	71,9	1,17
		75,5	91,4	0,83	75,8	1,00	79,8	0,95	71,9	1,05
		86,9	91,4	0,95	75,8	1,15	79,8	1,09	71,9	1,21
	Kreisförmiges	79,5	89,4	0,89	74,8	1,06	82,8	0,96	74,6	1,07
	Muster	79,5	89,4	0,89	74,8	1,06	82,8	0,96	74,6	1,07
		77,9	89,4	0,87	74,8	1,04	82,8	0,94	74,6	1,05
		83,4	89,4	0,93	74,8	1,12	82,8	1,01	74,6	1,12
		79,5	89,4	0,89	74,8	1,06	82,8	0,96	74,6	1,07
R4	Pyramiden	152	147	1,04	122	1,25	135	1,12	135	1,12
	0,5 mm	153	144	1,06	120	1,28	133	1,15	133	1,15
		154	144	1,07	119	1,29	133	1,16	133	1,16
		159	148	1,07	123	1,29	137	1,16	137	1,16
		148	150	0,99	124	1,19	138	1,07	138	1,07
	Geprägtes	143	131	1,09	118	1,21	129	1,11	129	1,11
	Muster	138	131	1,05	118	1,17	129	1,07	129	1,07
		144	130	1,11	117	1,23	128	1,13	128	1,13
		139	132	1,06	118	1,17	129	1,07	129	1,07
		138	137	1,01	123	1,12	135	1,03	135	1,03
R5	Geprägtes	198	191	1,04	191	1,04	191	1,04	191	1,04
	Muster	176	191	0,92	191	0,92	191	0,92	191	0,92
		181	191	0,95	191	0,95	191	0,95	191	0,95

wird fortgesetzt

Fortsetzung **Tabelle A.59:**

			μ_{stat}		μ_{kin}		μ_{adj}		$0{,}9 \cdot f_{tens} + \mu_{adj}$	
		$F_{V,test}$	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.	$F_{V,exp}$	Vgl.
R6	Prototyp v1	156	183	0,85	152	1,03	160	0,97	144	1,08
		154	183	0,84	152	1,02	160	0,96	144	1,07
		146	187	0,78	152	0,96	160	0,91	144	1,01
		149	183	0,81	152	0,98	160	0,93	144	1,04
		153	183	0,84	152	1,01	160	0,96	144	1,07
		142	183	0,78	152	0,94	160	0,89	144	0,99
		148	187	0,79	152	0,98	160	0,93	144	1,03
		150	183	0,82	152	0,99	160	0,94	144	1,04
	Prototyp v2	155	227	0,68	180	0,86	206	0,75	185	0,84
		157	227	0,69	180	0,87	206	0,76	185	0,85
		179	227	0,79	180	1,00	206	0,87	185	0,97
		167	227	0,74	180	0,93	206	0,81	185	0,90
		192	227	0,85	180	1,07	206	0,93	185	1,04
		180	227	0,79	180	1,00	206	0,87	185	0,97
R7	Prototyp 500kN	491	641	0,77	508	0,97	539	0,91	485	1,01
		499	518	0,96	518	0,96	518	0,96	485	1,03
		499	518	0,96	518	0,96	518	0,96	485	1,03
		443	486	0,91	486	0,91	486	0,91	485	0,91
		503	518	0,97	518	0,97	518	0,97	485	1,04
MIN				0,68		0,86		0,75		0,84
MAX				1,12		1,34		1,22		1,26
MEAN				0,92		1,10		1,00		1,04

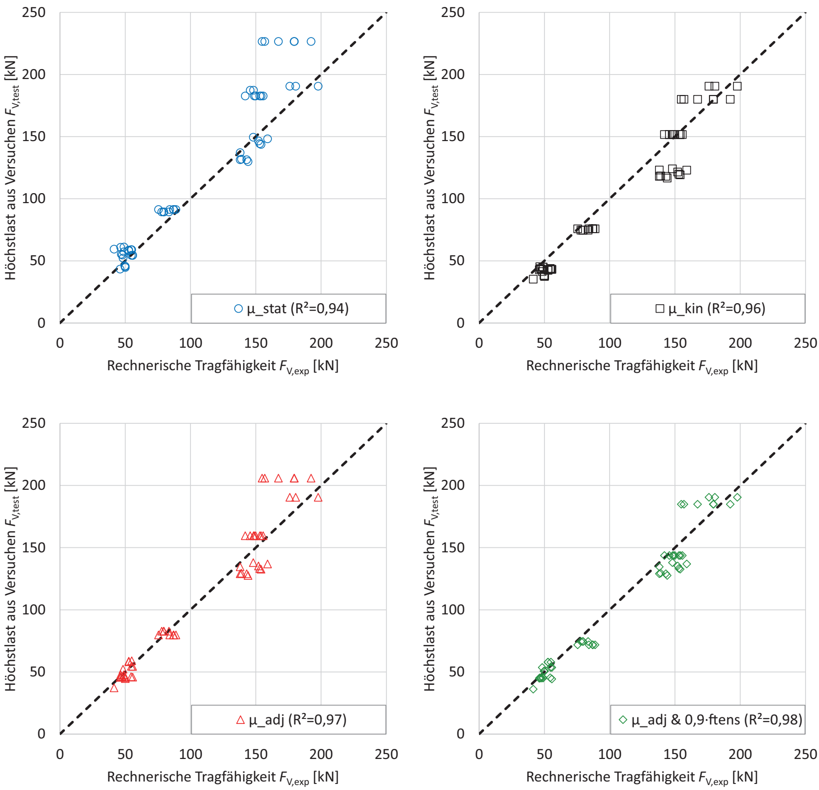


Bild A.47: Vergleich von Versuchsergebnissen mit rechnerischen Tragfähigkeiten für verschiedene Reibbeiwerte.

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)
HOLZBAU UND BAUKONSTRUKTION

Systemverbinder eignen sich aufgrund ihres hohen Vorfertigungsgrades besonders zur Realisierung wirtschaftlicher Haupt-Nebenträger-Verbindungen im Holzbau. Diese Verbinder bestehen oft aus Aluminium. Der eingesetzte Hochleistungsaluminiumwerkstoff bringt jedoch verschiedene Nachteile mit sich, durch die das Einsatzspektrum der HT-NT-Verbinder begrenzt wird. Nachteilig sind u.a. der geringe Feuerwiderstand sowie die sehr energieintensive und teure Herstellung der Aluminiumlegierungen.

In diesem Forschungsprojekt wurden neue Verbinder erstmals aus Kunstharzpressholz (KPH) realisiert. Zu Beginn erfolgte eine Oberflächenbehandlung des KPH, um die Reibung zwischen Verbinder und Holzbauteil in den Scherfugen zu erhöhen und somit die Tragfähigkeit der Verbindung deutlich zu steigern. In Reibversuchen wurden Reibbeiwerte der verschiedenen Oberflächen ermittelt. In anschließenden Druck-Scher-Versuchen wurde das Verhalten der modifizierten Oberflächen in Verbindungen mit geneigt eingedrehten Vollgewindeschrauben untersucht. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden verschiedene Verbinderprototypen gefertigt und in alle Lastrichtungen geprüft. Basierend auf den Druck-Scher-Versuchen wurde zudem ein analytisches Rechenmodell entwickelt.

ISBN 978-3-7315-1191-5
9 783731 511915 >

ISSN 1860-093X
ISBN 978-3-7315-1191-5

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier